



Interreg
España - Portugal



Fundo Europeu de Desenvolvemento Regional

MARRISK

Proyecto: 0262_MARRISK_1_E

ACTIVIDAD: 3

ACCIÓN: 3.1

TÍTULO ENTREGABLE: E3.6. HERRAMIENTAS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN COSTERA Y EVALUACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE LOS SISTEMAS DUNARES

BENEFICIARIO RESPONSABLE: UVIGO

BENEFICIARIOS PARTICIPANTES: UVIGO, IH, MeteoGalicia, CIIMAR, U.Aveiro, U.Minho, APA, INESC TEC

FECHA REALIZACIÓN: 31/10/2019

ANEXOS:

Se adjuntan Anexos:

SI

NO

Lista Anexos adjuntos:

ÍNDICE

Índice de Figuras.....	3
Índice de Tablas	5
1 Introducción.....	6
2 Objetivos.....	8
3 Fuentes de Datos.....	8
3.1 Datos auxiliares.....	8
3.1.1 Datos de oleaje	9
3.1.2 Litología en la costa.....	9
3.1.3 Tejido socioeconómico.....	10
3.1.4 Infraestructuras de datos espaciales	12
4 Estudios de campo.....	13
4.1 Programas de Muestreo Sistemático: monitorización	13
4.1.1 Playa de Patos, España.....	15
4.1.2 Costa de Aveiro, Portugal.....	26
4.1.3 Costa de Caminha a Espinho, Portugal	30
4.2 Observación sistemática	34
5 Herramientas Predictivas	35
5.1 Mapas de Riesgo	35
5.2 Formulaciones empíricas y simulaciones numéricas	38
5.2.1 Modelización hidrodinámica en el noroeste de Portugal	42
5.3 Modelización GIS.....	52
6 Valor Añadido	54
7 Evaluación del Servicio Ecosistémico de los Sistemas Dunares	58
8 Integración en la gestión costera	59
9 Conclusiones	62
10 Referencias.....	63

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de Venn que refleja que el riesgo es el resultado de la interacción de la existencia de una amenaza, controlada por factores externos, y de la vulnerabilidad y exposición, controladas por factores socioeconómicos (tomada de Satta et al., 2016).	7
Figura 2. Localización de la playa de Patos en la Ría de Vigo, al noroeste de España y ejemplo de topobatimetría adquirida durante el proyecto MarRISK, junto con las líneas de navegación realizadas.	16
Figura 3. Instrumentación empleada en los levantamientos topobatimétricos realizados en la playa de Patos. a) GPS Trimble 5800 empleado en la adquisición de datos topográficos. b) Embarcación INNDAAGA. Se puede observar en la banda de babor el poste en configuración de T en posición abatida, sobre el que se montan las antenas del GPS y la ecosonda Kongsberg GeoSwath Plus. c) Ecosonda GeoSwath Plus con unidad inercial incorporada (cilindro plateado a la derecha de la imagen). d) Par de GPS Trimble SPS855 y SPS852H empleados en la obtención de posicionamiento y rumbo (vectorial). e) Perfilador de velocidad de sonido Valeport SWIFT SVP.	17
Figura 4 (página anterior). Mapas con los levantamientos topobatimétricos y las batimetrías y topografías aisladas realizados en las fechas indicadas en la playa de Patos. La leyenda del primer mapa es común a todos los mapas de esta figura.	20
Figura 5. Mapas con diferencias batimétricas derivadas de los MDE obtenidos en las fechas indicadas. Las pérdidas superiores a 10 cm de elevación se representan en rojo y las ganancias superiores a 10 cm se representan en verde. La leyenda del primer mapa es común a todos los mapas y a los de la Figura 7.	20
Figura 6. Histogramas que muestran la frecuencia absoluta de celdas con acreción (valores positivos) y pérdida (valores negativos) de sedimento. Nótese la distribución simétrica en torno a 0 en todos los casos.	21
Figura 7. Mapas con diferencias topográficas derivadas de los MDE obtenidos en las fechas indicadas. Las pérdidas superiores a 10 cm de elevación se representan en rojo y las ganancias superiores a 10 cm se representan en verde. La leyenda de estos mapas se puede encontrar en la Figura 5.	24
Figura 8. Histogramas que muestran la frecuencia absoluta de celdas con acreción (valores positivos) y pérdida (valores negativos) de sedimento. Nótese la asimetría y polimodalidad existentes, en contraposición a los histogramas batimétricos mostrados en la Figura 6.	25
Figura 9. Perfiles de playa obtenidos a partir de los 8 MDE topográficos obtenidos entre noviembre de 2017 y 2019.	26
Figura 10. Área de estudio en la zona costera de Aveiro (NW Portugal) indicando la localización de las estaciones de medida de los perfiles topográficos en las playas: Barra (P1), Costa Nova (P2, P3), Costinha (P4), Vagueira (P5), Vagueira Splash (P6), Areão Norte (P7), Areão Sur (P8) y Mira (P9).	27
Figura 11. a) Sistema INSHORE. b) Monociclo geodésico	28
Figura 12. Perfil duna-playa pre-tormenta (línea verde) y post-tormenta (línea naranja) en la playa de Barra (traducido de López-Olmedilla et al., 2019).	29
Figura 13. Evolución de la línea de costa (1958-2018) en el sector Barra- Costa Nova (NW Portugal). Nota: M-muelle sur (año de construcción no disponible), E-espigones (año de construcción 1972/1973) (modificado de Fernández-Fernández et al., 2019b).	29
Figura 14. Plan de vuelo para la toma de fotografías aéreas (A) y localización del área de estudio (B).	31
Figura 15. Plan de vuelo para la obtención de fotografías aéreas con UAV (A) e UAV DJI Matrice 200 (B).	32
Figura 16. Ejemplos del MDT obtenido con LiDAR (A) y de MDE obtenidos a partir de fotografías aéreas obtenidas desde un avión (B) y con un UAV (C).	32
Figura 17. Ejemplo de la línea de costa extraída del MDT obtenido con LiDAR (rosa) y de los MDE obtenidos a partir de fotografías aéreas obtenidas con avión en 2017 (azul) y 2018 (naranja).....	33
Figura 18. Ejemplo de perfiles para un segmento, trazados a partir del MDT obtenido con LiDAR y de los MDE obtenidos a partir de fotografías aéreas obtenidas con avión (A) y parte de los MDE de noviembre de 2017 y mayo de 2018, junto con su mapa de diferencias (B).	33
Figura 19. Ejemplo de mapa de vulnerabilidad asociada al indicador elevación media generado en el ámbito del entregable 2.3 del proyecto MarRISK.	37

<i>Figura 20. Clasificación del BVI en función del valor promedio y variabilidad de su distribución estadística (figura tomada de Alexandrakis y Poulos, 2014).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 21. Ámbito espacial y discretización del modelo regional, de los modelos locales y de los modelos en playas (costeros).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 22. Rosas de oleaje en la costa noroeste de Portugal obtenidas a partir de los resultados del modelo regional para el año 2004.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 23. Rosas de oleaje en las áreas de estudio de los ríos Miño (panel superior izquierdo) y río Lima (panel superior derecho) obtenidas para la simulación del evento de oleaje más intenso del años 2004 y comparativa entre niveles simulados y observados en Enero de 2004 en el mareógrafo de Viana do Castelo (panel inferior izquierdo) junto con la cuantificación de la efectividad de los niveles simulados en esta localización (panel inferior derecho).....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 24. Perfiles empleados en la construcción de los modelos XBeach de las playas de Moledo y Cabedelo (panel superior) e información topobatemétrica utilizada con los modelos XBeach bidimensionales en las zonas costeras adyacentes a los estuarios de los ríos Miño (panel inferior izquierdo) y Lima (panel inferior derecho).....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 25. Resultado de las simulaciones de niveles extremos para las playa de Moledo en los cinco escenarios considerados (la línea azul representa el nivel extremo del mar).....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 26. Resultado de las simulaciones de niveles extremos para la playa de Cabedelo en los cinco escenarios considerados (la línea azul representa el nivel extremo del mar).....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 27. Resultado de áreas inundadas en el evento de tormenta del 8 de Enero de 2004 en las zonas costeras adyacentes a los estuarios de los ríos Miño (panel superior izquierdo) y Lima (panel superior derecho) y resultado de niveles para las proyecciones en 2050 de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en las zonas costeras adyacentes a los estuarios de los ríos Miño (panel inferior izquierdo) y Lima (panel inferior derecho).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 28. Configuración de diferentes fuentes de datos de previsión e información en la interfaz de Delft-FEWS.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 29. Algoritmo implementado en CERA 2.0, junto a su implementación en la interfaz del Graphical Modeler de QGIS y ejemplo de aplicación en un tramo de costa próximo a Aveiro, Portugal (modificado de Narra et al., 2019).....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 30. Flujo de trabajo en el marco de CRAF, en el que se evalúa el riesgo costero en dos fases para la identificación de zonas potenciales de riesgo crítico para una evaluación posterior más detallada (tomado de van Dongeren et al., 2018).....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 31. Representación del modelo DPSIR, en el que establece la interrelación entre todos los elementos involucrados (tomado de https://servicio.mapama.gob.es/sia/indicadores/modelo.jsp).....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 32. Implementación del modelo DPSIR recogido en la Tabla 7 en el ámbito del proyecto EUROSION (tomado de EUROSION (2002))......</i>	<i>57</i>
<i>Figura 33. a) Estrategias de gestión de la respuesta frente a la erosión costera. b) Ejemplos de la gestión del riesgo de erosión mediante la construcción de defensas, la adaptación y la retirada planificada. c) Estrategias de gestión incluyendo la adaptación (tomada de Williams et al., 2018).....</i>	<i>60</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Tipos de datos auxiliares relevantes para la evaluación de la erosión costera y enlaces para su acceso</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2. Infraestructuras de datos espaciales con información relevante para la evaluación de la erosión costera y enlaces para su acceso.</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 3. Fechas de realización de las topografías y las batimetrías.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 4. Cambios de elevación medios del área analizada en cada período y cambio de volumen asociados.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 5. Valores medios de la tasa de variación de la línea de costa (m/año) estimados mediante el método del ‘end point rate’ para cada uno de los períodos.</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 6. Características técnicas de algunos de los modelos numéricos empleados en la simulación de cambios morfodinámicos en la costa.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 7. Indicadores utilizados en trabajos de evaluación de vulnerabilidad costera.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 8. Implementación del modelo DPSIR enfocada al análisis del riesgo de erosión efectuada en el ámbito del proyecto EUROSION (modificado de EUROSION, 2002).....</i>	<i>56</i>

1 Introducción

Aproximadamente el 40% de la población mundial vive a menos de 100 km de la línea de costa; un 20% si se consideran los 25 km más próximos (Williams, et al., 2018). Consecuentemente, la zona costera tiene un valor importante desde el punto de vista de la gestión del territorio, pues su densidad de población es elevada y agrupa los bienes e infraestructuras necesarios para dar servicio a esta población. Además, la actividad económica desarrollada en su entorno supone un porcentaje importante del PIB de los países costeros. A modo de ejemplo, el aporte de las playas españolas al PIB se estima en un 10%, aunque únicamente suponen un 0,001% del territorio nacional (Williams, et al., 2018). En Portugal las cifras son similares, con una contribución del turismo al PIB del 11%, del que el 90% se concentra en las zonas costeras (European Commission, 2006).

Optimizar el estado en el que se encuentra la franja costera y tomar las medidas para que su futura evolución como consecuencia de cambios naturales y antropogénicos mantenga los servicios que se obtienen en la misma es de suma importancia para los países costeros. Entre las presiones con mayor potencial de impacto en las zonas costeras globales está el calentamiento global. Como consecuencia de este calentamiento se prevé que el nivel del mar ascienda, ocupando tierras emergidas en el proceso. Este fenómeno tendrá mayor impacto en áreas de baja pendiente, donde la superficie ocupada será proporcionalmente mayor, así como en zonas que actualmente están situadas bajo el nivel medio del mar y están protegidas frente a la inundación por barreras naturales, como las dunas costeras, o artificiales. Otra consecuencia del calentamiento global es un previsible aumento de la frecuencia e intensidad de las tormentas, y consecuentemente, del clima marítimo que afecta a las costas (Mentaschi et al., 2017; Reguero et al., 2019). En este sentido, el transporte de sedimentos en dirección longitudinal y transversal a la costa puede verse alterado, como sugieren por ejemplo los resultados obtenidos por Fernández-Fernández et al. (2019a) en el ámbito del proyecto MarRISK que predicen una disminución en el período 2081-2100 del transporte longitudinal y un incremento hacia el norte bajo un escenario RCP 8.5. Si este sedimento se retira del sistema costero y de su dinámica estacional, la consecuencia es un aumento de la erosión costera y por tanto una retirada de la línea de costa, una menor protección natural frente a las tormentas y el aumento del nivel del mar, y un mayor potencial de inundación de las áreas adyacentes.

La Unión Europea calcula que el coste de aplicar medidas de protección contra la erosión e inundaciones costeras alcanzará los 5.400 millones de Euros en el período 1990-2020 (EEA, 2019). Para aumentar la resiliencia de las zonas costeras frente a los efectos adversos del cambio climático es preciso adoptar medidas que contribuyan a su conservación, a su adaptación adecuada a los cambios, así como a su prevención en aquellos casos en que esto sea posible. Estas medidas precisan de la adopción de metodologías específicas centradas en las amenazas sobre la franja

costera y herramientas que permitan evaluar el riesgo de efectos nocivos en la zona costera, como las inundaciones y la erosión.

En la evaluación del riesgo costero es preciso distinguir entre las dos componentes fundamentales del riesgo, que son la peligrosidad o amenaza y la vulnerabilidad. La peligrosidad es la probabilidad de que un suceso potencialmente dañino ocurra. La vulnerabilidad cuantifica el valor del daño potencial de que ese suceso dañino ocurra. Este último factor se puede modular con la exposición, que cuantifica qué proporción de esa vulnerabilidad está efectivamente expuesta al peligro (Figura 1). El IPCC (2014) considera riesgo al “potencial de consecuencias en que algo de valor humano (incluidos los propios humanos) está en peligro con un desenlace incierto. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de acaecimiento de sucesos o tendencias peligrosos multiplicada por las consecuencias en caso de que ocurran tales sucesos. Los riesgos resultan de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y el peligro”. Las herramientas que se presentarán en este documento están orientadas a la cuantificación de la erosión. La vulnerabilidad de las zonas de estudio se presentó en el entregable 2.3. Su uso combinado permitirá cuantificar el riesgo derivado de la erosión costera.

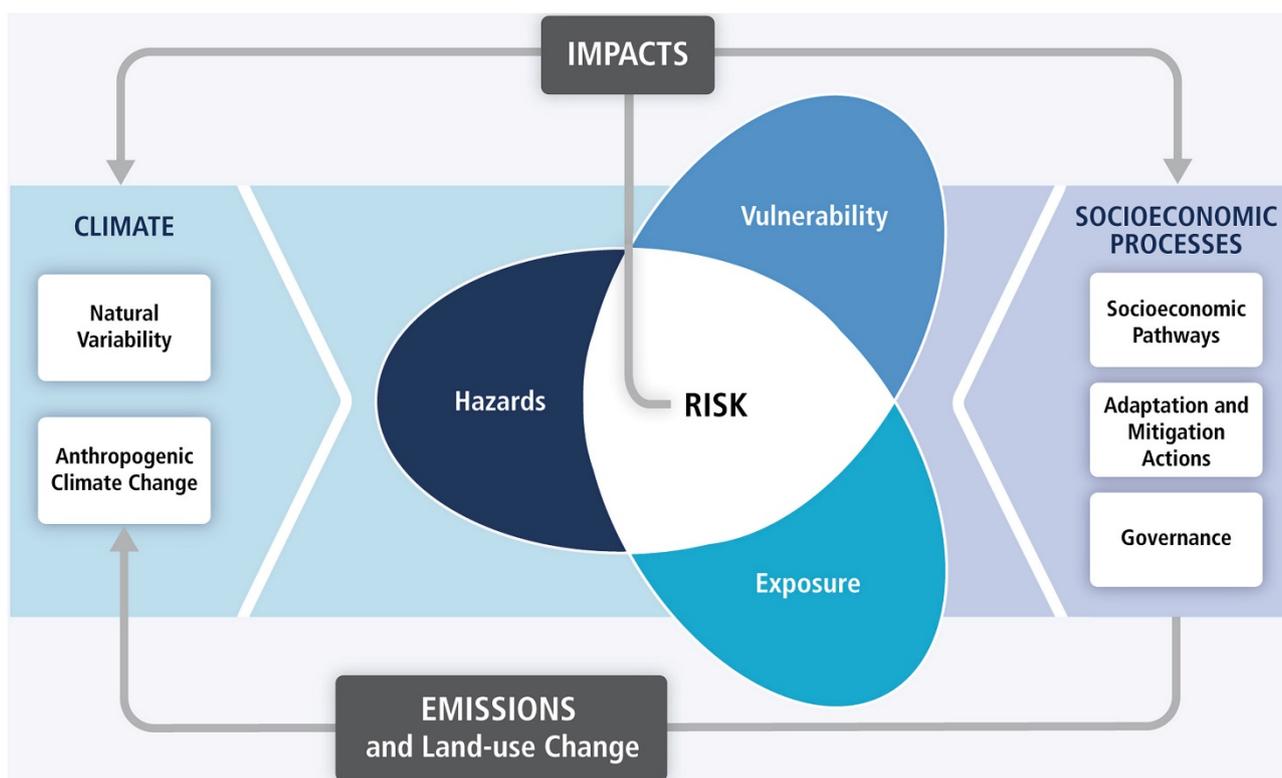


Figura 1. Diagrama de Venn que refleja que el riesgo es el resultado de la interacción de la existencia de una amenaza, controlada por factores externos, y de la vulnerabilidad y exposición, controladas por factores socioeconómicos (tomada de Satta et al., 2016).

Los agentes sociales con interés en la erosión costera son múltiples, y abarcan diferentes niveles de organización administrativa, desde el nivel local hasta el nivel supranacional. Si bien la cuantificación de la erosión costera se puede realizar desde el nivel individual, la toma de decisiones

relativas a la gestión del riesgo corresponde típicamente a entidades nacionales, con la colaboración de organismos regionales y locales, generalmente guiados por directivas o recomendaciones supranacionales. Este entregable sirve de referencia para la consulta del conjunto de herramientas disponibles, con distinto grado de complejidad en su utilización e implementación, disponibles para la evaluación del riesgo de erosión costera por parte de los colectivos con interés o responsabilidad en este proceso.

2 Objetivos

Este entregable se marca como objetivo general compilar un conjunto de herramientas útiles para la evaluación del riesgo de erosión costera y evaluación del servicio ecosistémico de los sistemas dunares. Inicialmente se introducirán los datos auxiliares que son generalmente necesarios para una correcta estimación de este riesgo, además de proporcionar enlaces a recursos públicos donde se pueden obtener estos datos, generalmente en agencias gubernamentales cuya misión es recopilar, analizar y publicar los mismos junto con su contexto, sus metadatos. A continuación, se presentarán y describirán las distintas herramientas seleccionadas, en orden creciente de complejidad tanto de utilización como de implementación por los distintos agentes con interés en la evaluación del riesgo de erosión costera, como por ejemplo la monitorización o la simulación mediante modelos numéricos de situaciones futuras o de posibles actuaciones en la costa. Algunas de estas herramientas se ilustrarán con resultados obtenidos en las áreas de estudio del proyecto: playa de Patos en España, Aveiro y el sector entre Espinho y Caminha, en la costa Norte de Portugal. Estos casos de estudio ilustrarán el empleo de algunas de las herramientas presentadas. Para las herramientas que no cuentan con ejemplos de resultados obtenidos en el marco del proyecto MarRISK se hará referencia a estudios representativos existentes en la literatura científica.

Por último, estos objetivos se complementan con una discusión sobre el valor que aportan estas herramientas, de los distintos niveles a los que éstas se pueden implementar como parte de planes de gestión costera y/o marcos de evaluación sistematizados.

3 Fuentes de Datos

3.1 Datos auxiliares

La erosión costera es un proceso complejo, que resulta de la interacción de múltiples variables de naturaleza muy diversa, que es necesario tener en cuenta para una correcta evaluación de los riesgos derivados de la misma. Estas variables cuantifican procesos dinámicos, como el oleaje, las corrientes costeras, o el viento; describen la naturaleza de los materiales susceptibles de ser erosionados, como su litología, el tamaño del sedimento, o su morfología; o recogen información socioeconómica que puede verse alterada por la erosión costera, como el tipo de usos del suelo, el

valor de bienes afectados, o la contribución a las actividades económicas directamente relacionadas con el área en riesgo de erosión costera.

Los datos relevantes pueden obtenerse mediante un diseño experimental o de recogida de información implementada de forma específica para la tarea que los requiere. Sin embargo, en muchos casos, dada la versatilidad de los datos involucrados, de interés para otras disciplinas como la meteorología, la gestión urbanística y la economía, se encuentran disponibles en bases de datos públicas, cada vez con más frecuencia accesibles por Internet.

Entre los datos auxiliares con mayor relevancia para el análisis de la erosión costera se encuentran los siguientes:

- Características del oleaje (altura, período y dirección)
- Litología en la costa
- Relativos al tejido socioeconómico

3.1.1 Datos de oleaje

Los datos relativos al oleaje proceden de dos fuentes principales: boyas de medida que incorporan además otro tipo de sensores oceanometeorológicos y propagaciones de oleaje obtenidas mediante modelos numéricos validados. Estos datos se procesan y se facilitan a los usuarios interesados generalmente mediante consultas a través de visores disponibles en Internet. En España, estos datos (Tabla 1) están disponibles en la plataforma *Portus*, gestionada por el ente público Puertos del Estado, así como en los servicios de MeteoGalicia, y en el Observatorio Oceanográfico da Marxe Ibérica Raia. En Portugal estos datos los facilita el Instituto Hidrográfico (IH). En estas plataformas están disponibles datos en tiempo real, predicciones basadas en modelos numéricos e históricos de un conjunto de parámetros oceanometeorológicos, entre ellos diversos valores relativos al oleaje como la altura significativa, o los períodos y direcciones media y de pico.

Como parte de los resultados del proyecto MarRISK, este tipo de datos así como otros específicos relacionados con las actividades del proyecto también pueden consultarse en la plataforma web <http://marrisk.inesctec.pt>.

3.1.2 Litología en la costa

La susceptibilidad a la erosión costera depende del tipo de materiales geológicos presentes. Con los mismos forzamientos externos, la erosión que se experimentará en una zona determinada será diferente si la costa es un acantilado rocoso de materiales ígneos o una costa arenosa de grano fino.

El tipo de litología en la costa se puede determinar *in situ*, mediante una cartografía geológica *ad hoc*, o se puede obtener de la cartografía geológica de los diferentes servicios geológicos nacionales. En el caso de España, la cartografía geológica la produce el Instituto Geológico y Minero

de España. Los proyectos MAGNA y GEODE completaron la cartografía geológica a escala 1:50.000 del territorio español. Esta cartografía puede obtenerse en la URL indicada en la Tabla 1. Además, está disponible como Servicio Web de Mapas (WMS) para su consulta directamente desde un Sistema de Información Geográfica (GIS) como por ejemplo ArcGIS o el software libre QGIS. En Portugal estos datos pueden consultarse en los servicios del Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG).

3.1.3 Tejido socioeconómico

Para una correcta evaluación de un riesgo, ha de estimarse el impacto que tendría la ocurrencia de un evento dañino sobre las comunidades afectadas por el mismo. Esto incluye asignar un valor, económico o en otros términos, como daños a personas, población afectada, etc., a las zonas sometidas a la amenaza. En el caso de la erosión costera, las tres dimensiones más significativas a considerar son los usos del suelo, el valor de los bienes ubicados en zonas expuestas o del coste de oportunidad derivado de su pérdida, y el impacto directo o propagado sobre infraestructuras sistémicas u otras actividades con alto valor añadido para las comunidades en riesgo.

La información sobre el tejido socioeconómico procede de fuentes dispares, en función del tipo de dato de que se trate. El valor de bienes inmuebles puede obtenerse del Catastro, los usos del suelo del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE), dependiente del Ministerio de Fomento, algunas infraestructuras como redes de transporte del Instituto Geográfico Nacional de España, así como otro tipo de datos disponibles en el Instituto Nacional de Estadística de España (INE (ES)). En Portugal la información relevante puede consultarse en la Dirección General del Territorio, en PORDATA, así como en el Instituto Nacional de Estatística de Portugal (INE (PT)). A nivel europeo y con gestión de la Agencia Europea de Medio Ambiente está disponible el servicio CORINE Land Cover, que compila y pone a disposición pública su base de datos geoespacial con 44 tipologías de ocupación del suelo a escala 1:100000.

Tabla 1. Tipos de datos auxiliares relevantes para la evaluación de la erosión costera y enlaces para su acceso

Tipos de datos	Nombre del servicio	URL
Oceanometeorológicos	PORTUS	http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx
	MeteoGalicia	https://www.metogalicia.gal
	Observatorio Oceanográfico da Marxe Ibérica Raia	http://www.marnaraia.org
	MarRISK	http://marrisk.inesctec.pt
	Instituto Hidrográfico	https://www.hidrografico.pt
Litología	MAGNA/GEODE	http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Geode.aspx
	LNEG	https://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/dossiers/geologia_portugal
Socioeconómico	Catastro	https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx?buscar=S
	SIOSE	https://www.siose.es
	IGN	https://www.ign.es/web/ign/portal
	INE (ES)	https://www.ine.es/welcome.shtml
	Dirección General del Territorio	http://www.dgterritorio.pt/
	PORDATA	https://www.pordata.pt/Portugal
	INE (PT)	https://www.ine.pt/
CORINE	https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover	

3.1.4 Infraestructuras de datos espaciales

La diversidad de tipos de datos y de fuentes de los mismos, así como la necesidad de contar con una infraestructura de datos espaciales homogénea y armonizada ha motivado la aparición de portales agregadores de datos geoespaciales (Tabla 2), como la Infraestructura de Datos Geoespaciales de España (IDEE), mantenida por el Ministerio de Fomento de España, el servicio de Informação Geográfica de Portugal (iGEO), el Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG) o su homólogo a nivel Europeo, el Geoportal INSPIRE, que agrupa datos espaciales de esta naturaleza conforme a la Directiva INSPIRE 2007/2/CE aprobada por el Parlamento Europeo y el Consejo el 14 de marzo de 2007. Ésta persigue crear una infraestructura de datos espaciales a nivel europeo de utilidad para las políticas y actividades que puedan tener un impacto medioambiental, y contempla 34 temas de datos espaciales necesarios para aplicaciones ambientales. Otro ejemplo destacable de repositorio de datos directamente relacionados con el medio marino y costero es la Red Europea de Datos y Observaciones Marinas (EMODNET), que recopila y gestiona datos procedentes de más de 150 organizaciones agrupados en siete temáticas: batimetría, geología, hábitats marinos, química, biología, física, y actividades humanas.

Tabla 2. Infraestructuras de datos espaciales con información relevante para la evaluación de la erosión costera y enlaces para su acceso.

Nombre del Agregador	URL
IDEE	http://www.ideo.es/web/guest/proyectos-ideo
iGEO	http://www.igeo.pt
SNIG	https://snig.dgterritorio.gov.pt
INSPIRE	http://inspire-geoportal.ec.europa.eu/
EMODNET	http://www.emodnet.eu/

4 Estudios de campo

Una de las mejores herramientas para la evaluación del grado de erosión costera es la observación sistemática y continuada en el tiempo de las zonas de interés. Este procedimiento permite determinar el estado en que se encuentra la costa, y su comparativa a lo largo del tiempo determinar cuál es su evolución neta y estimar sus tendencias futuras. Al analizar la evolución del sistema es importante considerar que los sistemas costeros están sujetos a cambios estacionales que forman parte de su propia dinámica natural. La monitorización en igualdad de condiciones ambientales y una serie temporal suficientemente larga son estrategias que contribuyen a minimizar interpretaciones incorrectas sobre la evolución de la costa y el riesgo de erosión.

4.1 Programas de Muestreo Sistemático: monitorización

La gestión costera debe basarse en una comprensión adecuada del sistema costero en su conjunto, incluyendo los procesos físicos, sus agentes forzadores, así como las interrelaciones que se establecen entre estos y cuáles son sus efectos. Estos factores no son estáticos, sino que experimentan cambios a lo largo del tiempo, en forma de tendencias y de ciclos. Por tanto, esta comprensión debe actualizarse de forma periódica y sostenida, y debe utilizarse para la evaluación de escenarios futuros de riesgo de erosión (Bio et al., 2015).

Las aproximaciones metodológicas empleadas en la monitorización de la erosión costera son múltiples, aunque en general se centran en el seguimiento de la posición de la línea de costa o de las variaciones volumétricas y/o morfológicas en playas. Las técnicas empleadas para esta monitorización son muy variadas, desde métodos clásicos empleando instrumentos ópticos de alta precisión pero muy laboriosos (niveles ópticos, estaciones totales, teodolitos) y por tanto de baja resolución espacial y temporal, hasta técnicas fotogramétricas, con mayor cobertura pero con un alto coste para obtener las imágenes necesarias.

En tiempos recientes, la generalización de métodos basados en GPS, con posibilidad de obtener correcciones en tiempo real para mejorar la precisión hasta escala milimétrica (GPS diferencial, Real Time Kinematic (RTK)) ha permitido la obtención de datos topográficos con amplia cobertura y resolución espacial a bajo coste. Esto ha popularizado su empleo con fines de monitorización de la costa al permitir la planificación periódica de levantamientos topográficos, que permiten determinar la existencia de crecimiento o disminución neta del volumen de sedimentos en la costa, o del desplazamiento de la línea de costa.

Otra técnica de alta precisión para la obtención de datos topográficos es el empleo de técnicas láser, como LiDAR (Light Imaging Detection and Ranging). Si bien su uso no está tan extendido debido al elevado coste de adquisición de los equipos. Un ejemplo de la aplicación de LIDAR para la obtención de datos topobatimétricos con fines de monitorización de los riesgos de

erosión es la red de observatorios costeros desarrollada en Francia (Kerguillec et al., 2019). Este autor cita ejemplos similares de otros países como Reino Unido y Holanda, y constata el escaso grado de implantación de observatorios costeros en Europa y el contraste entre el norte y sur de Europa en el establecimiento de planes sistemáticos de observación de la costa.

El riesgo de erosión no viene determinado únicamente por la parte emergida de la costa, en particular en playas. La parte sumergida forma parte activa de la playa, y condiciona además el impacto del clima marítimo y del transporte sedimentario en la misma. Por tanto, para un seguimiento adecuado no es suficiente con registrar los cambios en la posición de la línea de costa y de la morfología de las playas, sino que es necesario integrar la batimetría de las zonas de estudio. La obtención de datos batimétricos es más compleja que la de datos topográficos. Los sistemas acústicos como las ecosondas monohaz o multihaz son los sistemas de adquisición más frecuentes y versátiles. En particular, las sondas multihaz aportan una gran cobertura y precisión para estos fines. Sin embargo, la adquisición de datos batimétricos es mucho más infrecuente que la de datos topográficos. Esta discrepancia viene justificada porque los equipos necesarios para ello son mucho más costosos, con un mantenimiento más complejo y requieren un elevado grado de formación por parte de los operadores. Además, para una adquisición segura y de calidad, los requisitos de clima marítimo son muy exigentes, haciendo virtualmente imposible una adquisición en ambientes costeros de baja profundidad cuando el oleaje excede de 2 m de H_s . La tecnología LIDAR aerotransportada puede suplir estas dificultades en condiciones de alta transparencia del agua y para bajas profundidades, y es la tecnología empleada en los observatorios costeros descritos en Kerguillec et al. (2019). Este tipo de trabajos se suelen complementar con una caracterización granulométrica o litológica, así como una evaluación de la dinámica sedimentaria. Los datos auxiliares presentados anteriormente pueden aportar esta información o de las condiciones oceanometeorológicas reinantes.

Uno de los parámetros más relevantes para evaluar el riesgo de erosión costera es el resultado del balance sedimentario, es decir, el resultado neto del aporte y retirada de sedimentos en la costa. Si éste es positivo, la franja costera está en acreción, aumentando su volumen y extensión. Por otra parte, si éste es negativo, se producirá erosión. En una playa este balance depende de la interacción entre la hidrodinámica y el transporte sedimentario (Fernández-Fernández et al., 2016). El transporte longitudinal, o deriva sedimentaria, es uno de los factores más relevantes para la erosión costera, y se produce como resultado de la llegada oblicua de frentes de olas a la playa. Su estimación es compleja, y se realiza frecuentemente a partir de formulaciones calibradas con coeficientes empíricos ajustados a condiciones particulares de laboratorio o estudios de campo. Como resultado, se obtiene generalmente una infraestimación con un factor de 2-10 en playas de baja energía, y una sobreestimación de aproximadamente un factor 2 en playas de alta energía (Fernández-Fernández et al., 2016). Para paliar esta limitación, se requieren

determinaciones experimentales, siendo el estudio de trazadores sedimentarios una de las metodologías más versátiles para este propósito, y que se pueden incorporar como parte de un programa de monitorización a medio-largo plazo, que permita identificar la tendencia general del sistema de estudio con independencia de su fluctuación estacional.

En el ámbito del proyecto MarRISK se han desarrollado seguimientos a lo largo del tiempo de las playas de Patos (Nigrán, España), la costa de Aveiro (Portugal), y el tramo de costa entre Caminha y Espinho (Portugal) que se presentan en este entregable como casos de estudio de la aplicación de estas herramientas.

4.1.1 Playa de Patos, España

Se llevó a cabo un estudio piloto en la playa de Patos, situada en el margen Sur de la Ría de Vigo, al sur de Galicia, España (Figura 2). Esta playa está situada en el sector más externo de dicha ría, y por tanto es la playa arenosa de la ría de Vigo con las condiciones más próximas a las playas portuguesas monitorizadas en el proyecto MarRISK. Para el análisis de los indicadores de erosión, vulnerabilidad y riesgo de erosión considerados en este proyecto, se planteó un seguimiento de la evolución topográfica de la zona intermareal y supramareal de la playa, así como de la batimetría de la zona submareal hasta aproximadamente 20 metros de profundidad. El elevado coste y complejidad de la instrumentación y embarcación necesaria para la obtención de datos batimétricos, la dificultad de su procesado, y las limitaciones que el oleaje impone para trabajar próximos a la costa explican la poca presencia de topobatimetrías en este tipo de estudios. Por tanto, la adquisición de batimetría y topografía de forma coordinada es un planteamiento deseable en todos los proyectos de evaluación de la morfodinámica de playas y ha sido un éxito derivado del proyecto MarRISK.

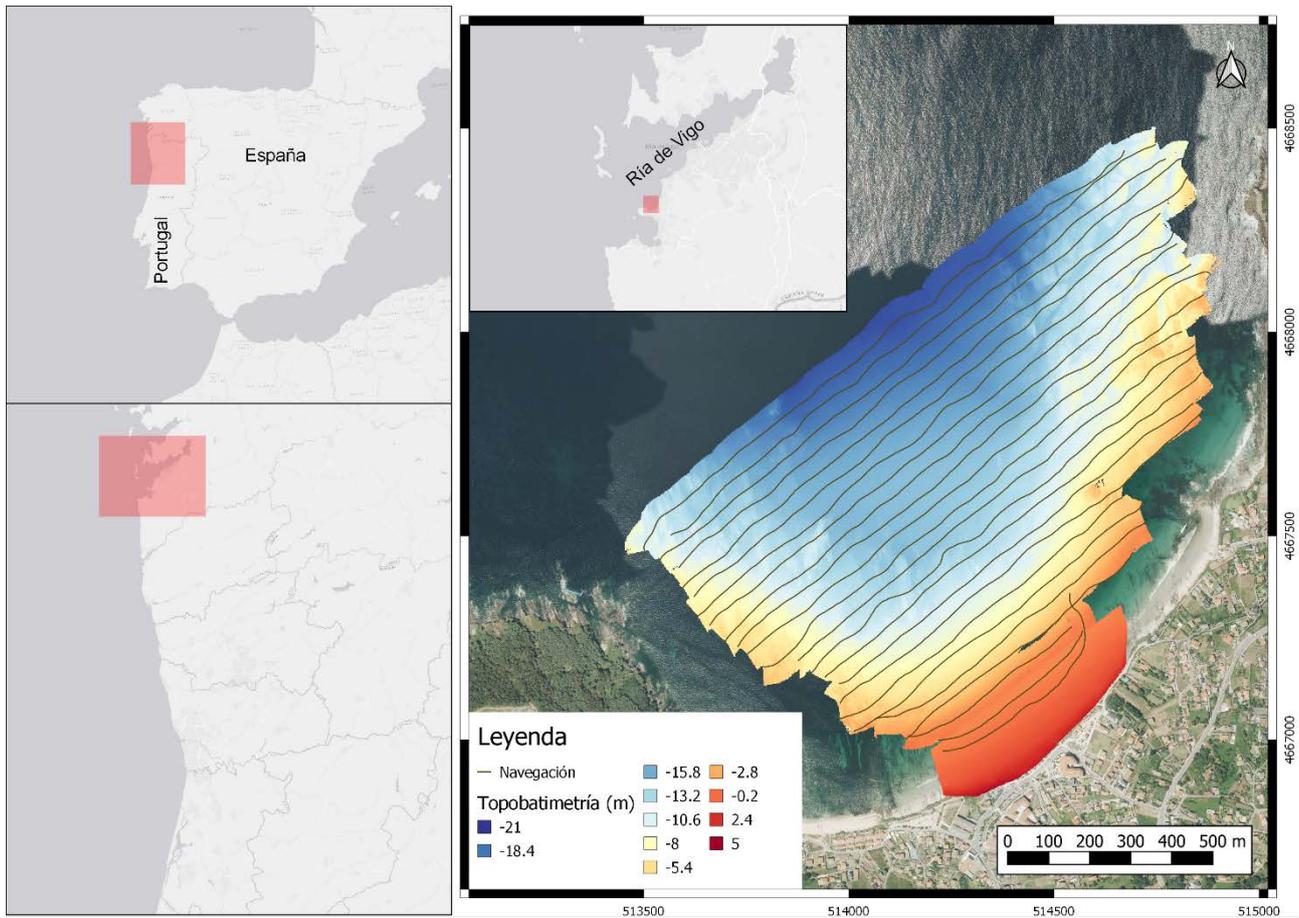


Figura 2. Localización de la playa de Patos en la Ría de Vigo, al noroeste de España y ejemplo de topobatemetría adquirida durante el proyecto MarRISK, junto con las líneas de navegación realizadas.

La adquisición de datos topográficos georreferenciados se realizó mediante GPS con correcciones RTK proporcionadas en tiempo real vía telefonía móvil por el servicio NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) del Instituto Geográfico Nacional de España. La corrección obtenida permitió obtener datos topográficos con una precisión de 1-2 cm. La adquisición se realizó a pie con un GPS Trimble 5800 (Figura 3a) montado en un poste anclado a una mochila, y una tasa de adquisición de 1 Hz.

Los levantamientos batimétricos se llevaron a cabo con una ecosonda interferométrica Kongsberg GeoSwath Plus (Figura 3c), montada en un poste vertical centrado en la banda de babor de la embarcación INNDAGA, perteneciente al grupo de investigación GEOMA de la Universidad de Vigo (Figura 3b). Esta ecosonda permite obtener datos de forma simultánea a babor y estribor de la embarcación, hasta una profundidad de 50 metros y una cobertura máxima de en torno a 400 metros. La influencia del movimiento de la embarcación (alabeo, cabeceo, guiñada y alzada) se corrigió en tiempo real con los datos inerciales proporcionados por la unidad IMU SMC-108 incorporada en la carcasa de la sonda (Figura 3c). Las alteraciones debidas a la refracción de la propagación del sonido en la columna de agua se corrigieron durante la etapa de postprocesado a

partir de perfiles verticales de velocidad de sonido obtenidos el mismo día de la adquisición de datos con un perfilador de velocidad de sonido Valeport SWIFT SVP (Figura 3e). Los datos de posicionamiento se obtuvieron con un par de GPS posicional y vectorial Trimble SPS855/SPS852H (Figura 3d) conectados a dos antenas situadas en la parte superior del poste de la ecosonda. Con esta configuración se obtuvieron datos posicionales y de rumbo con una precisión de 10Hz y 1 Hz, respectivamente. Como en el caso de la topografía se recibieron mediante red móvil correcciones RTK con precisión de 1-2 cm proporcionadas por el servicio NTRIP del IGN. El postprocesado de los datos batimétricos se realizó en el entorno software GS+ 3.5 de Geoacustics, cuya salida es un modelo digital de elevaciones (MDE) con una malla de 2 metros. Los MDE topográficos se calcularon con una malla de 1m en el entorno GIS QGIS versión 3.6.0, mediante una interpolación lineal basada en una red triangular. El procesamiento espacial de los datos y la generación de mapas se realizó en QGIS 3.6.0.

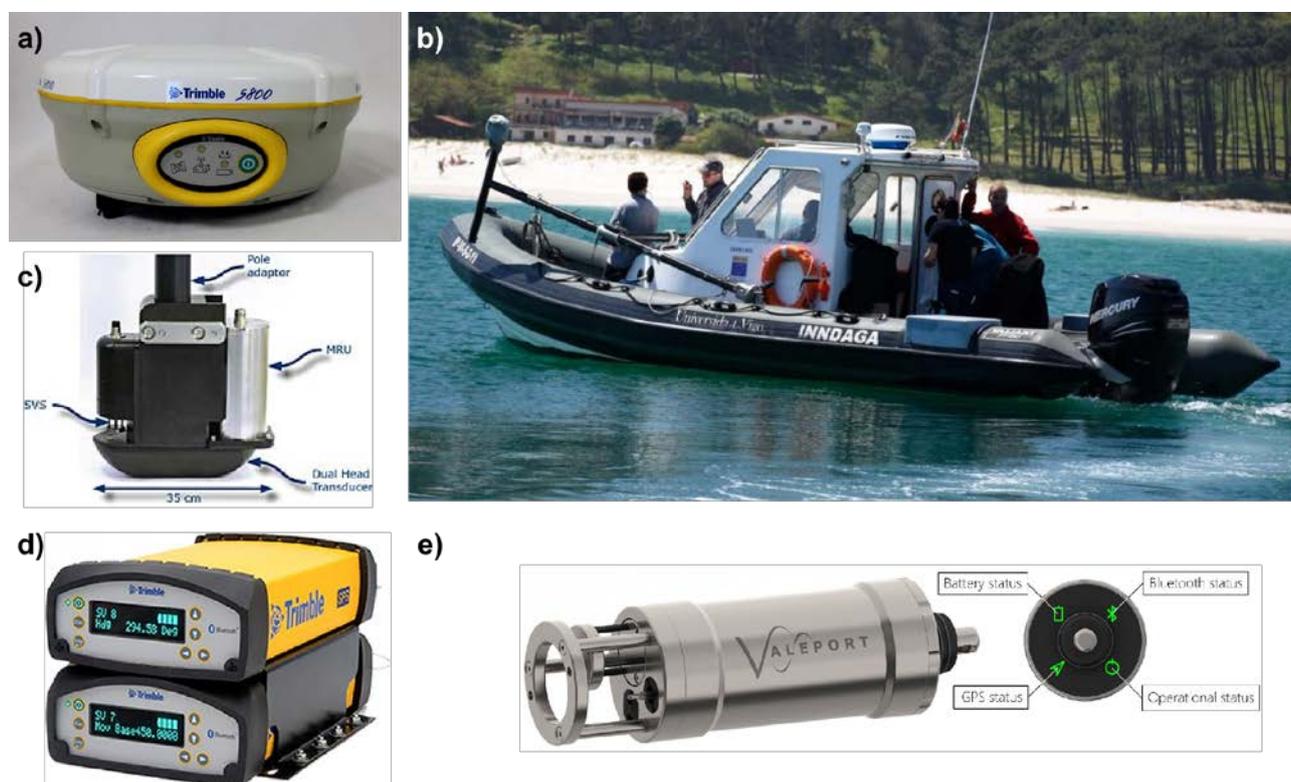


Figura 3. Instrumentación empleada en los levantamientos topobatimétricos realizados en la playa de Patos. a) GPS Trimble 5800 empleado en la adquisición de datos topográficos. b) Embarcación INNDAGA. Se puede observar en la banda de babor el poste en configuración de T en posición abatida, sobre el que se montan las antenas del GPS y la ecosonda Kongsberg GeoSwath Plus. c) Ecosonda GeoSwath Plus con unidad inercial incorporada (cilindro plateado a la derecha de la imagen). d) Par de GPS Trimble SPS855 y SPS852H empleados en la obtención de posicionamiento y rumbo (vectorial). e) Perfilador de velocidad de sonido Valeport SWIFT SVP.

El seguimiento topográfico se llevó a cabo en 8 ocasiones desde noviembre de 2017 hasta mayo de 2019 (Tabla 3). Los problemas logísticos y condicionantes meteorológicos limitaron los levantamientos batimétricos a 5, desde septiembre de 2018 hasta mayo de 2019 (Tabla 3). En total

se obtuvieron 4 topobatimetrías, 1 batimetría, y 4 levantamientos topográficos sin batimetría (Figura 4).

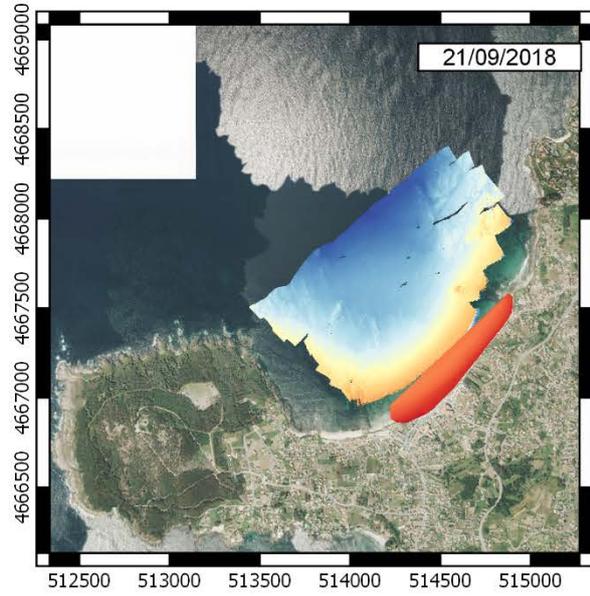
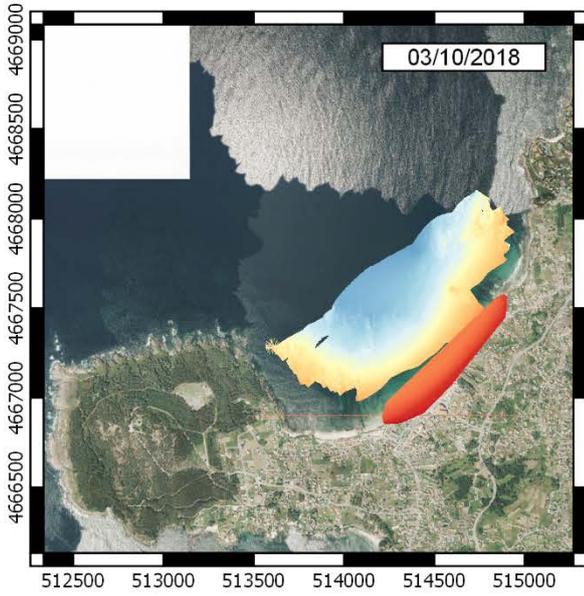
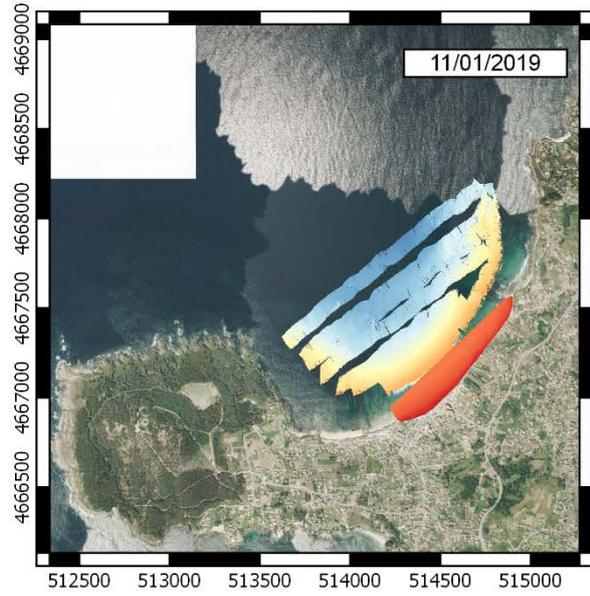
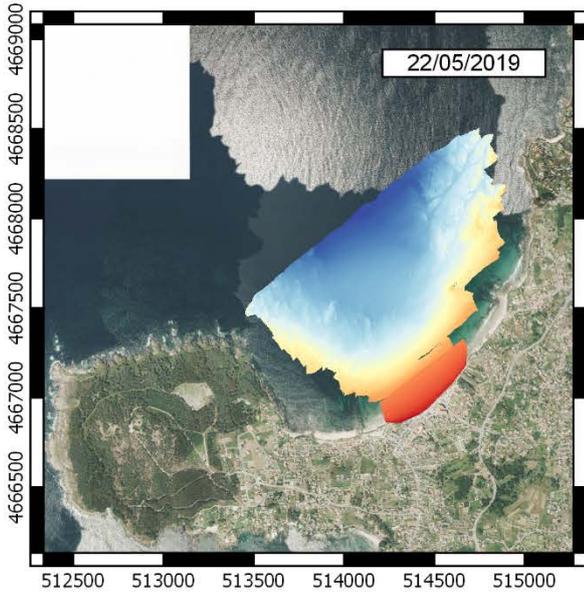
Tabla 3. Fechas de realización de las topografías y las batimetrías

Topografías	Batimetrías
08/11/2017	
24/09/2018*	
28/09/2018*	21/09/2018*
22/10/2018	03/10/2018*
21/12/2018	11/01/2019
11/01/2019	06/05/2019
04/02/2019	22/05/2019
22/05/2019	

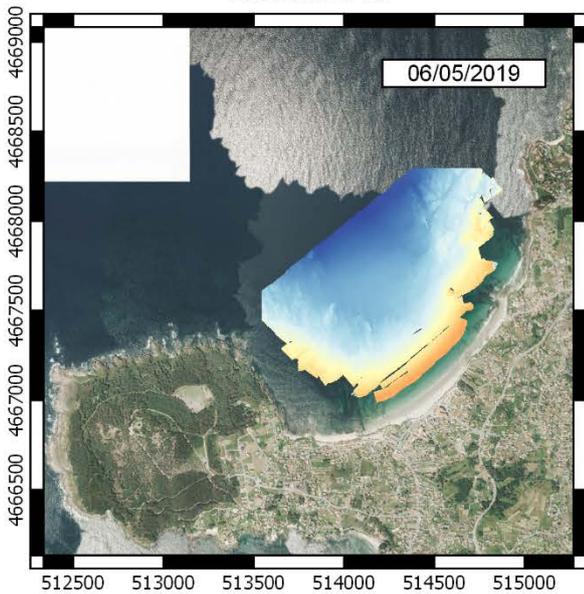
*Topografías y batimetrías realizadas con pocos días de diferencia debido a problemas logísticos y/o meteorológicos. En rojo se indican las fechas donde se obtuvieron exclusivamente topografías o batimetrías.

Para evaluar el balance sedimentario y los cambios morfológicos se realizó una comparación de los MDE obtenidos en las diferentes fechas. Se compararon el anterior y el posterior en todos los casos, el primero y último realizados, así como un MDE de invierno comparado con el del verano anterior. Los cambios observados en los levantamientos batimétricos (Figura 5) no mostraron una tendencia clara. En el período 03/10/2018-21/09/2018 se observa una acreción (en verde) de sedimentos en las zonas más profundas, mientras que, en el siguiente período, entre el 11/01/2019 y el 03/10/2018 se observa una pérdida comparable (en rojo) en la misma zona. Si bien el sedimento en esta zona puede haberse movilizado por el oleaje (como indica la existencia ubicua de ripples y megarripples hasta los 30 m de profundidad observados con sonar de barrido lateral e imágenes de video), el carácter irregular de los patrones de acreción y pérdida, así como su observación en zonas de afloramientos rocosos, y especialmente en algunos casos un bandeo estribor/babor de los patrones de acumulación y pérdida de sedimentos, lleva a interpretar parcialmente estos resultados como artefactos derivados de una compensación insuficiente de los movimientos de la embarcación durante la adquisición de datos batimétricos. En las zonas más someras, los datos son problemáticos debido al importante efecto de ruido que introduce el burbujeo de la columna de agua debido a la rotura del oleaje.

Topobatimetrías



Batimetría



Topografías

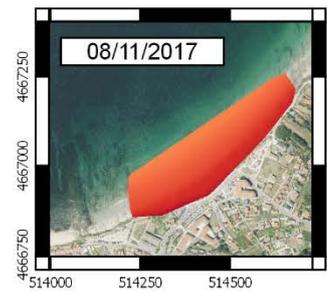
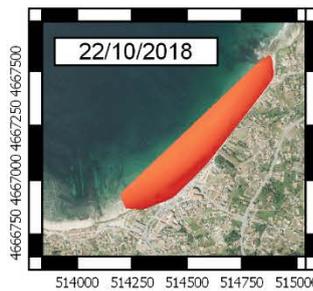
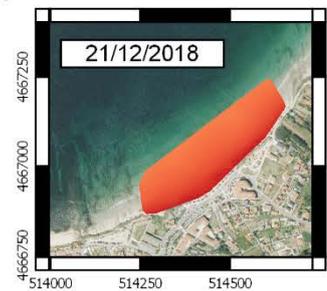
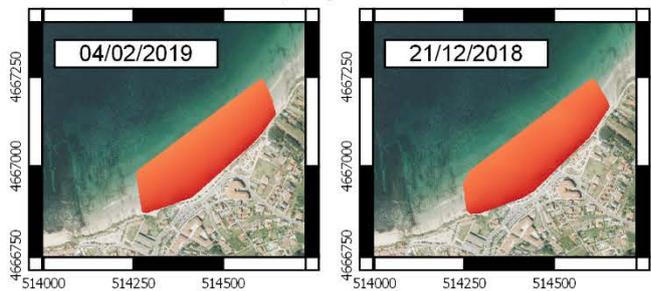


Figura 4 (página anterior). Mapas con los levantamientos topobatimétricos y las batimetrías y topografías aisladas realizados en las fechas indicadas en la playa de Patos. La leyenda del primer mapa es común a todos los mapas de esta figura.

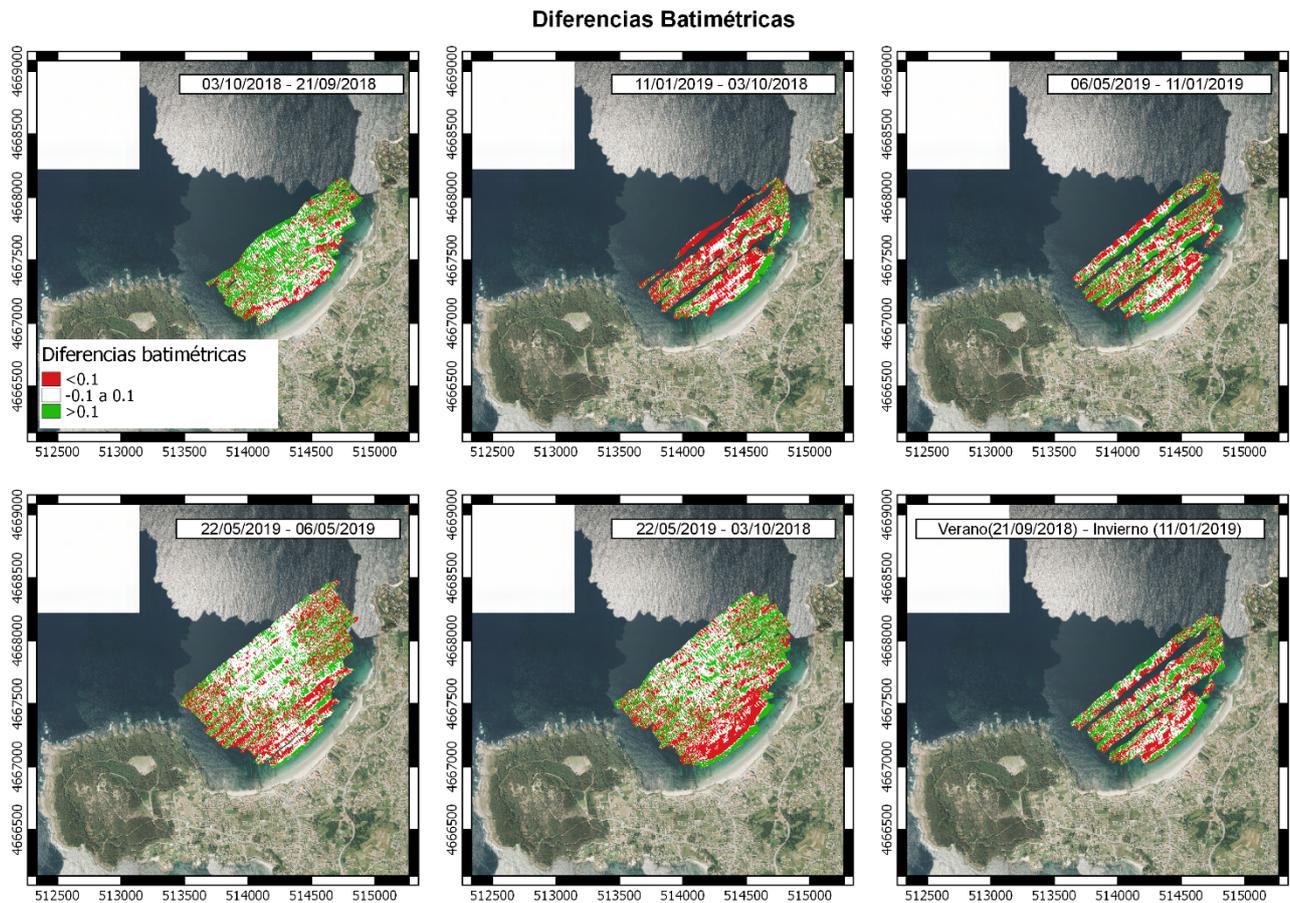


Figura 5. Mapas con diferencias batimétricas derivadas de los MDE obtenidos en las fechas indicadas. Las pérdidas superiores a 10 cm de elevación se representan en rojo y las ganancias superiores a 10 cm se representan en verde. La leyenda del primer mapa es común a todos los mapas y a los de la Figura 7.

La interpretación anterior se basa además en el análisis de los histogramas derivados de los mapas anteriores (Figura 6), que muestran una acreción y pérdida comparable cuando se analizan en conjunto. Este resultado solo puede interpretarse como una redistribución de sedimentos dentro del propio sistema y/o como resultado de ruido aleatorio, que por definición tiene una función de distribución simétrica, como los histogramas obtenidos.

Histogramas de Diferencias Batimétricas

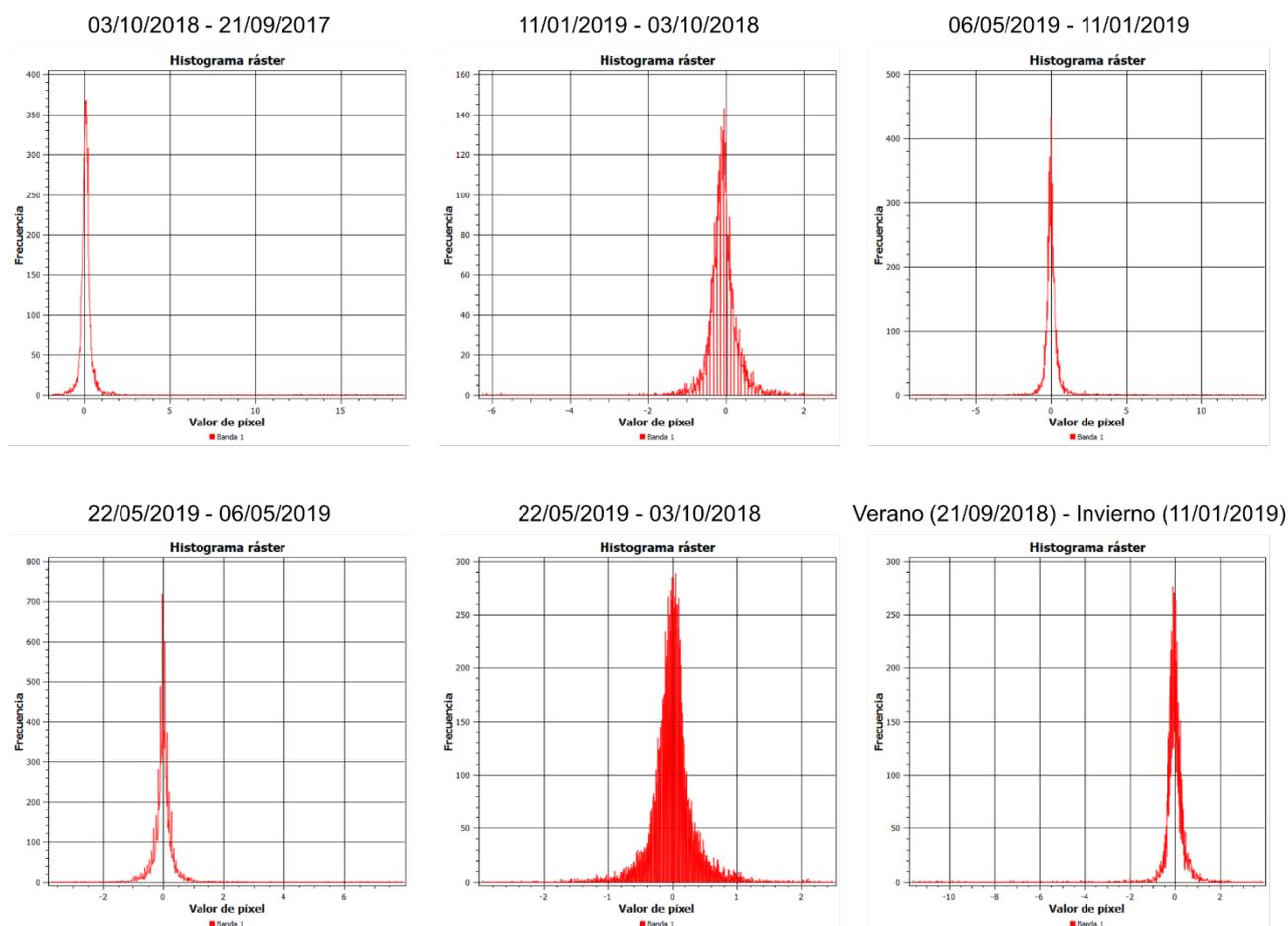


Figura 6. Histogramas que muestran la frecuencia absoluta de celdas con acreción (valores positivos) y pérdida (valores negativos) de sedimento. Nótese la distribución simétrica en torno a 0 en todos los casos.

Los mapas con las diferencias topográficas de la playa de Patos se muestran en la Figura 7. En general, se pueden observar los patrones de comportamiento siguientes. En los mapas 1 y 3 se observa una pérdida de elevación generalizada, derivada de una retirada de sedimento de la playa, con una pequeña acumulación neta en el frente de playa y/o berma. Estas condiciones son compatibles con un aumento de la energía del oleaje típico de finales de verano y otoño, en el que se retira sedimento de la playa y se puede producir una acumulación de los tamaños más gruesos en las zonas más elevadas alcanzadas por el oleaje. En los mapas 2, 5 y 7, se observa una acumulación generalizada de sedimento, especialmente la zona intermareal correspondiente al frente de playa e intermareal baja, que se interpreta como el resultado de un predominio de condiciones de bonanza que permiten la acumulación de material desde la zona submareal e intermareal baja hacia zonas más elevadas de la playa. La acumulación paralela a la playa en la zona intermareal baja, especialmente evidente en el mapa 2, sugiere la existencia de barras sedimentarias que migran hacia la zona alta típicas de períodos de acreción. En el mapa 4 se

aprecia la existencia de acumulaciones en la zona intermareal baja y zona de la berma y duna, con pérdidas equivalentes en la parte superior de la playa, patrón típico de condiciones invernales, donde se produce un trasvase de sedimentos de la parte superior de la playa a la inferior, y la mayor intensidad del viento puede alimentar con sedimentos eólicos las dunas. La pérdida neta de sedimentos del mapa 6 es compatible con una situación invernal, donde la mayor energía del oleaje provoca una retirada de sedimentos generalizada de la playa. La comparativa entre la situación final y la inicial muestra una disminución generalizada del volumen de sedimento en la playa, con una acumulación paralela a la playa en la zona intermareal baja, compatible con la existencia de una barra en esa localización, y pequeñas acumulaciones en la parte más alta de la playa en las zonas dunares. El mapa de la figura 9, correspondiente al cambio experimentado por la playa entre el final de verano de 2018 y el comienzo del invierno de 2019 es un ejemplo de la estacionalidad típica observada en esta región, en la que se produce un trasvase de sedimentos de la parte alta de la playa, en rojo, a la parte intermareal baja y submareal, en verde.

Los histogramas obtenidos a partir de los MDE topográficos (Figura 8) son en general asimétricos, con ejemplos polimodales como el primer caso (Figura 8). Esta asimetría demuestra el predominio en cada período analizado de la acreción en el caso de histogramas sesgados hacia valores positivos, y pérdida de sedimento, en caso contrario. La acreción o pérdida neta se puede observar mejor analizando el volumen ganado o perdido, respectivamente (Tabla 4). En la playa predominó la pérdida de volumen en la mayoría de los períodos analizados, exceptuando en septiembre de 2018, entre enero de 2019 y diciembre de 2018, y la primavera de 2019, donde la playa ganó volumen de forma neta. En todo el período analizado la playa perdió casi 19000 m³ de sedimento, que dadas las fechas de observación y la similitud con los volúmenes movilizados entre verano e invierno se interpretan como parte de la dinámica estacional típicamente observable en esta región. Los volúmenes movilizados obtenidos a partir de los datos batimétricos alcanzan en algunos casos valores muy elevados, que se explican por la mayor superficie analizada, de hasta 10 veces el tamaño de la playa. Comparando los valores obtenidos para todo el período analizado, la parte submareal de la playa acumuló 14640 m³ de sedimento, mientras que entre el verano y el invierno siguiente perdió 4652 m³, un valor muy pequeño comparado con el obtenido en la playa para el mismo período, 4 veces mayor en un área analizada aproximadamente 10 veces menor.

Tabla 4. Cambios de elevación medios del área analizada en cada período y cambio de volumen asociados.

	Período analizado	Cambio de elevación promediado (m)	Volumen de cambio (m ³)
Batimetrías	03/10/2018 – 21/09/2018	0,149	94592
	11/01/2019 – 03/10/2018	-0,078	-41652
	06/05/2019 – 11/01/2019	0,056	34160
	22/05/2019 – 06/05/2019	-0,006	-6396
	Fin – Inicio	0,014	14640
	Verano - Invierno	-0,007	-4652

Topografías	24/09/2018 – 08/11/2017	-0,136	-9054
	28/09/2018 – 24/09/2018	0,056	4344
	22/10/2018 – 28/09/2018	-0,115	-8936
	21/12/2018 – 22/10/2018	-0,136	-8714
	11/01/2019 – 21/12/2018	0,051	3265
	04/02/2019 – 11/01/2019	-0,083	-5096
	22/05/2019 – 04/02/2019	0,103	6339
	Fin – Inicio	-0,282	-18922
Verano - Invierno	-0,134	-16200	

Por último, se analizó la evolución temporal de los perfiles de playa obtenidos para el sector más amplio de la playa, en su extremo más occidental (Figura 9). Los perfiles obtenidos son coherentes con las variaciones en los MDE descritas con anterioridad. Los perfiles obtenidos en fechas invernales o primaverales muestran la morfología cóncava típica de condiciones predominantes más energéticas, con poco o ningún desarrollo de la berma. Por el contrario, en el caso de los perfiles veraniegos o de comienzos de otoño se registran perfiles con un mayor volumen y desarrollo del frente de playa y de la berma, observándose incluso una berma bien marcada en los correspondientes a septiembre de 2018. La secuencia de perfiles correspondientes a los 4 meses transcurridos en otoño de 2018, desde el 24/09/2018 hasta el 21/12/2018, muestran la transición entre un perfil típico de condiciones estivales a invernales, en que el frente de playa se va erosionando y la cresta de la berma termina por desaparecer hasta generar el perfil cóncavo típico de invierno.

De la monitorización de la playa de Patos descrita en esta sección se puede concluir que la metodología planteada es adecuada para la evaluación del balance sedimentario y riesgo de erosión en zonas costeras. En el período analizado la zona submareal de la playa de Patos ha incrementado su volumen en unos 15000 m³, cantidad comparable a la pérdida de 19000 m³ experimentada por la playa. En la playa estas cantidades son comparables a la variación estacional observada, y por tanto permiten considerar que las variaciones registradas se enmarcan en la variabilidad estacional natural de la playa de Patos. La determinación de una tendencia erosiva o acumulativa subyacente requeriría de un seguimiento temporal más prolongado.

Diferencias Topográficas

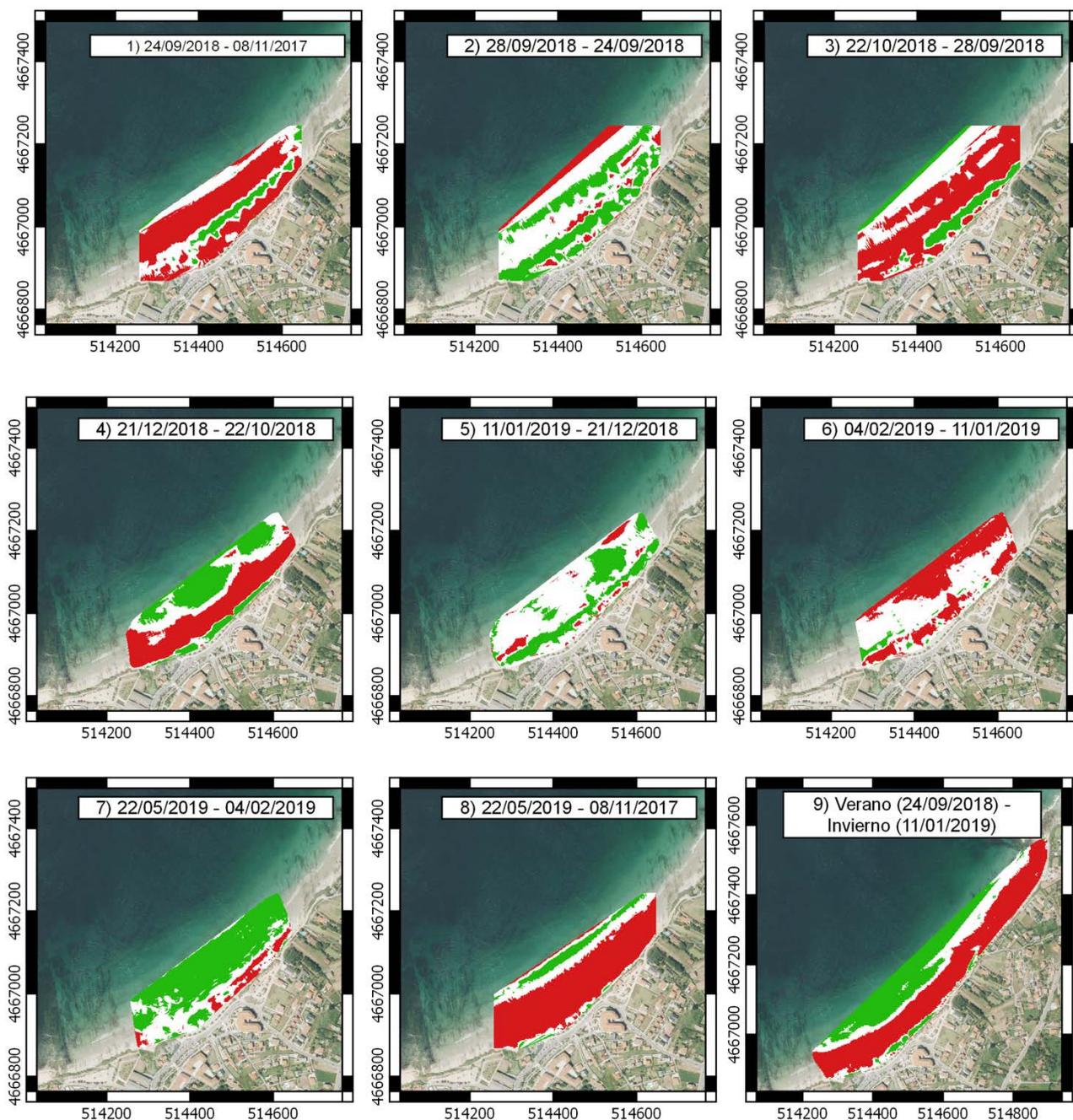


Figura 7. Mapas con diferencias topográficas derivadas de los MDE obtenidos en las fechas indicadas. Las pérdidas superiores a 10 cm de elevación se representan en rojo y las ganancias superiores a 10 cm se representan en verde. La leyenda de estos mapas se puede encontrar en la Figura 5.

Histogramas de Diferencias Topográficas

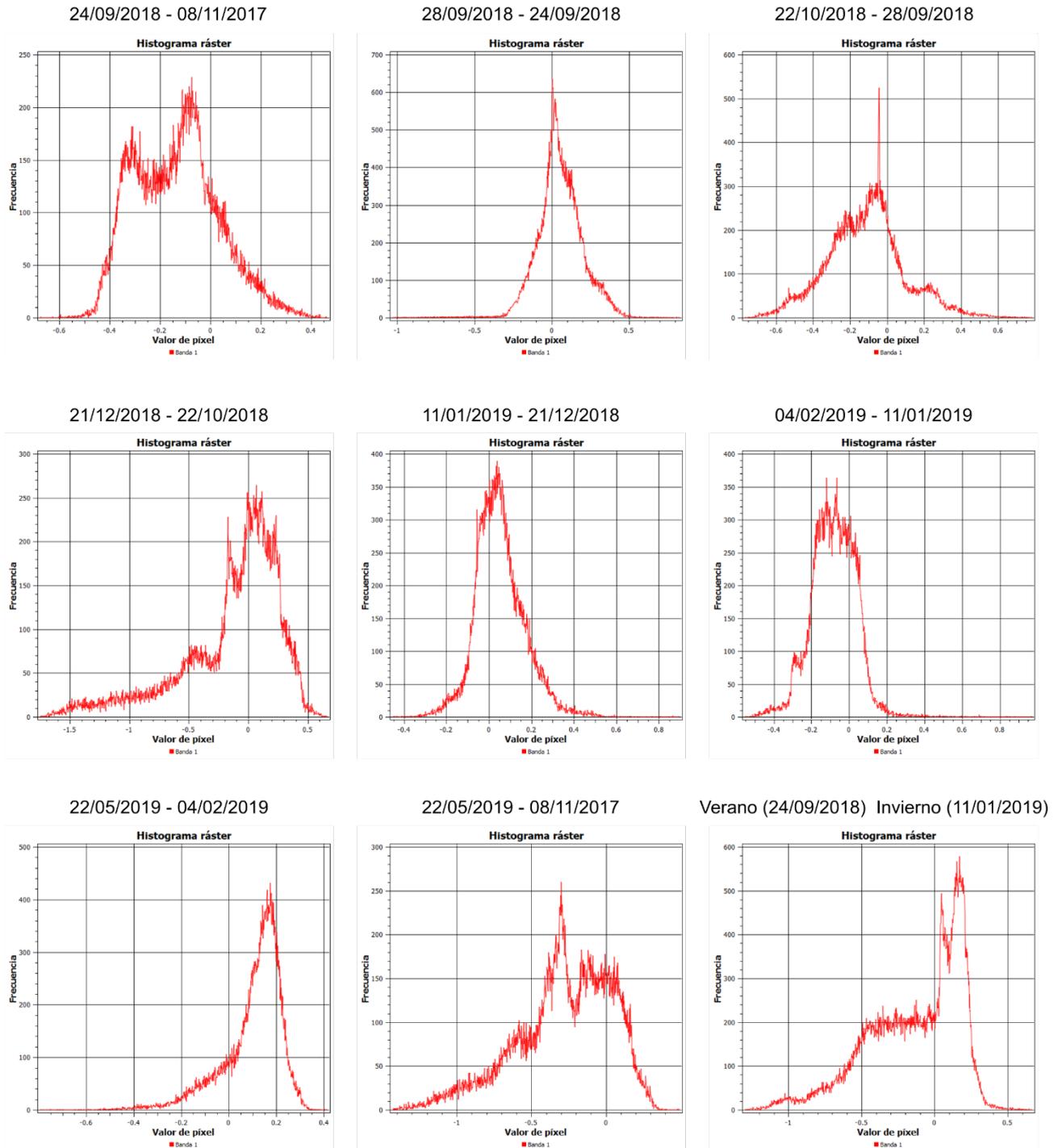


Figura 8. Histogramas que muestran la frecuencia absoluta de celdas con acreción (valores positivos) y pérdida (valores negativos) de sedimento. Nótese la asimetría y polimodalidad existentes, en contraposición a los histogramas batimétricos mostrados en la Figura 6.

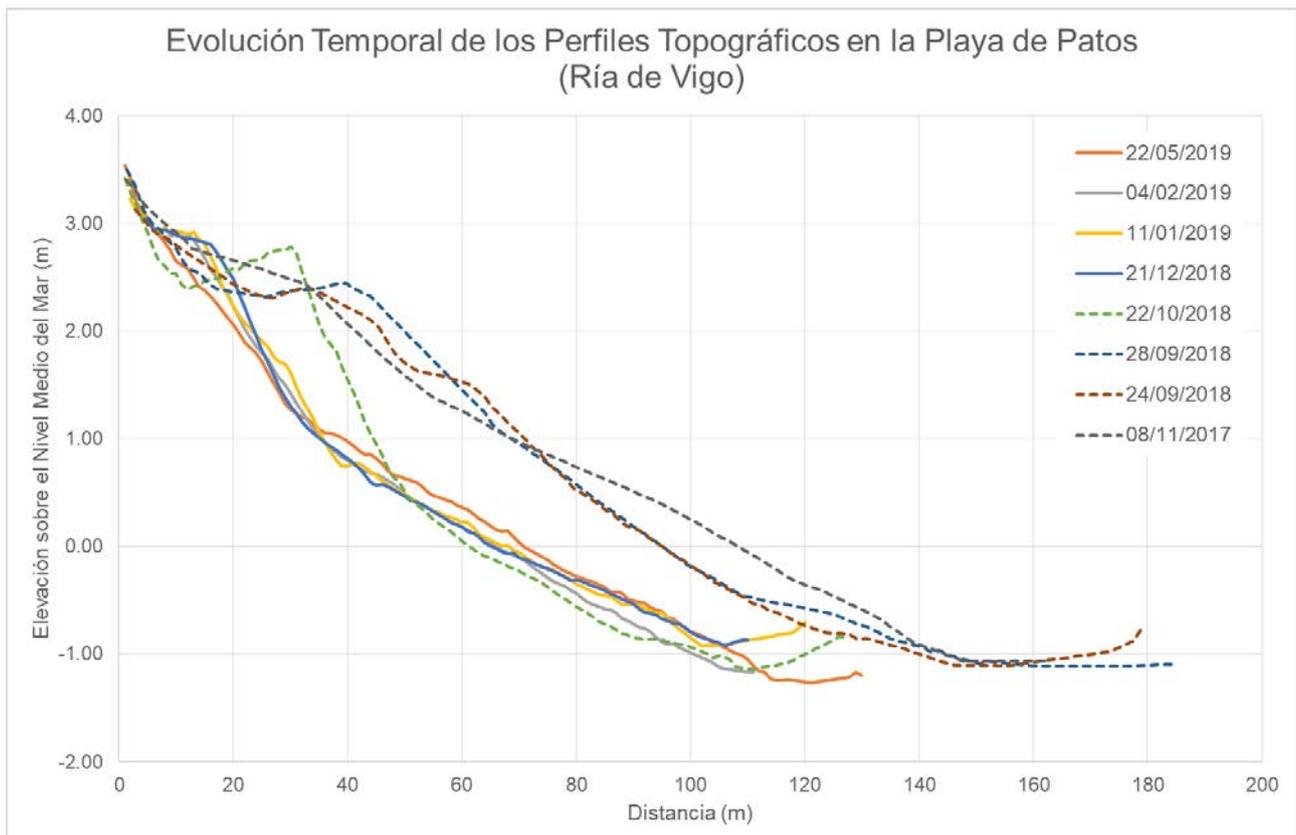


Figura 9. Perfiles de playa obtenidos a partir de los 8 MDE topográficos obtenidos entre noviembre de 2017 y 2019.

4.1.2 Costa de Aveiro, Portugal.

La zona costera de Aveiro constituye uno de los sectores más problemáticos en términos de vulnerabilidad y riesgo de erosión del sistema duna-playa en el Norte de Portugal. Esto se debe a su configuración geomorfológica, a la exposición a un clima marítimo altamente energético, así como a las obras de defensa costera (e.g., muelles, espigones y alimentaciones artificiales) realizadas desde los años 50.

La monitorización llevada a cabo en la zona costera de Aveiro (NW Portugal) tiene como objetivo estudiar la evolución del sistema duna-playa a medio y corto plazo para mejorar la gestión costera. Esta zona (Figura 10) comprende 22 Km de costa arenosa. Las playas monitorizadas son, de norte a sur: Barra, Costa Nova, Costinha, Vagueira, Areão y Mira (P1-P9 en Figura 10).

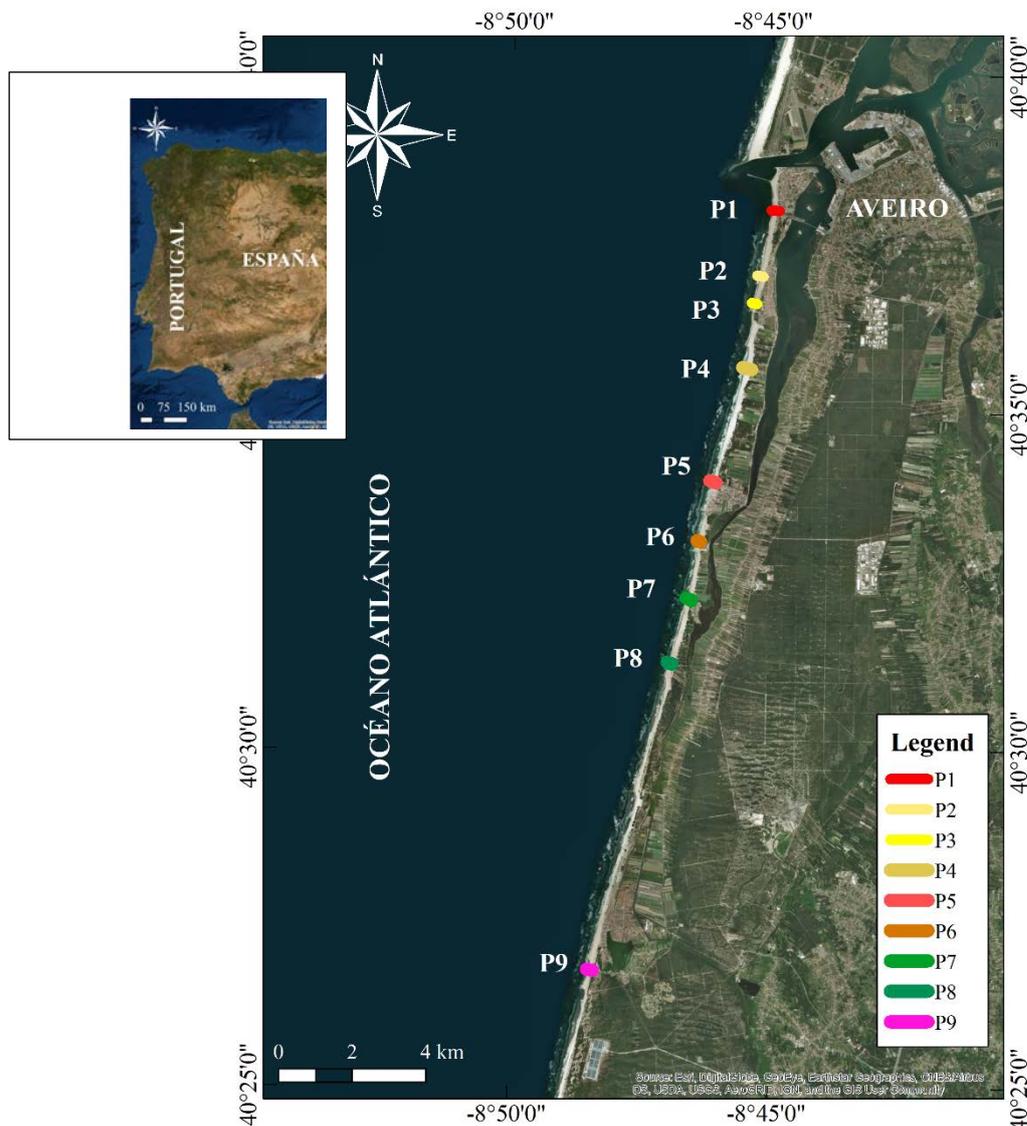


Figura 10. Área de estudio en la zona costera de Aveiro (NW Portugal) indicando la localización de las estaciones de medida de los perfiles topográficos en las playas: Barra (P1), Costa Nova (P2, P3), Costinha (P4), Vagueira (P5), Vagueira Splash (P6), Areão Norte (P7), Areão Sur (P8) y Mira (P9).

Los levantamientos topográficos se llevaron a cabo con el sistema INSHORE (Sistema Integrado de Elevada Resolución Espacial para la Monitorización de Playas; Baptista et al., 2011) que consta de tres antenas de GPS (una de alta frecuencia y dos de baja frecuencia), un distanciómetro y un inerciómetro instalados en un quad (Figura 11a). Además, y sobre todo en aquellos lugares de difícil acceso para el sistema INSHORE se empleó un monociclo geodésico que consta de un DGPS-RTK instalado sobre un bastón en una rueda de una bicicleta (Figura 11b).



Figura 11.a) Sistema INSHORE. b) Monociclo geodésico

Los datos obtenidos con ambos sistemas son procesados, limpiados y filtrados antes de ser analizados. La generación de modelos digitales del terreno se lleva a cabo a partir de los datos registrados por el sistema INSHORE, mediante una interpolación basada en el algoritmo *kriging*. Por otra parte, tanto los datos del sistema INSHORE como los del monociclo geodésico se utilizan para la extracción de indicadores geomorfológicos: posición de la línea de costa, posición de la línea de playa, anchura de la playa, altura de la base y de la cresta de la duna, altura de la berma, pendiente del frente de playa y volumen de la playa siguiendo la metodología descrita en el entregable 1.5 del proyecto.

El análisis de la evolución de las líneas de costa obtenidas con el GPS o a partir de fotografías aéreas se realiza utilizando la extensión para ArcGIS, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) (Thieler et al., 2009) considerando transectos transversales a la línea de referencia con un espaciado de 50 m. Los estadísticos son obtenidos utilizando solo aquellos transectos que son intersectados por todas las líneas de costa estudiadas.

Con estos datos se puede estudiar la evolución del sistema duna-playa a corto plazo, como por ejemplo tras la tormenta Adrián, la primera del invierno 2018/2019. En la Figura 12 se presentan los perfiles topográficos medidos antes y después de la tormenta en la playa de Barra (P1 en Figura 10). Esta tormenta comenzó el día 27 de octubre y acabó el día 28 de octubre de 2018, durando 54 horas y coincidiendo con mareas vivas. Se caracterizó por una altura significativa máxima de 5,6 m, una dirección media de 350° y un período pico medio de 11,2 s. Se observó que los valores de los indicadores geomorfológicos disminuían después de la tormenta, por ejemplo, la anchura de la playa en el sector osciló entre 33,6 y 112,8 m antes de la tormenta y entre 32,7 y 101,2 m después de la misma (López-Olmedilla et al., 2019).

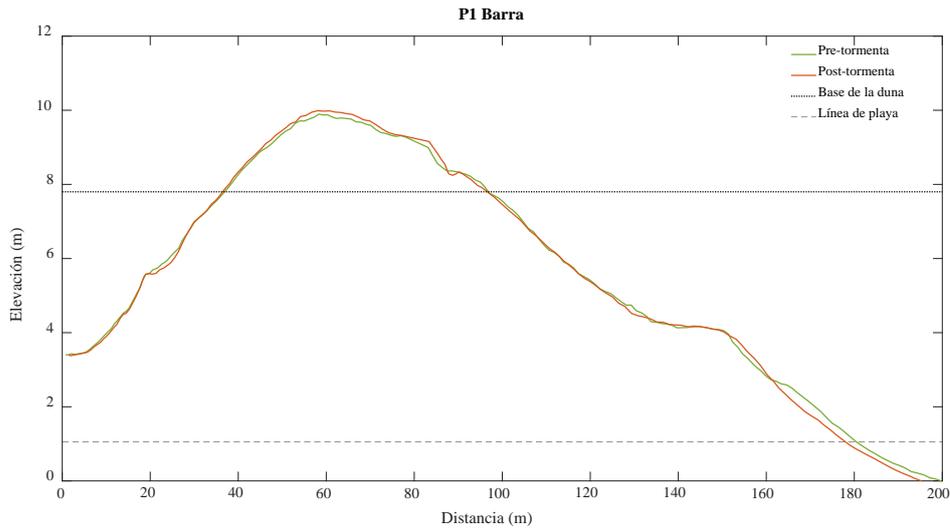


Figura 12. Perfil duna-playa pre-tormenta (línea verde) y post-tormenta (línea naranja) en la playa de Barra (traducido de López-Olmedilla et al., 2019).

Como ejemplo de su aplicación para la evaluación de esta zona a medio plazo se presenta el análisis de la evolución de la línea de costa en el sector Barra- Costa Nova a partir de las fotografías aéreas orto-rectificadas y georreferenciadas de los años: 1958, 1970, 1998, 2010 y de la imagen de satélite del año 2018 (Figura 13). El mayor retroceso de la línea de costa se produjo entre 1958-1970 debido a la construcción del muelle sur del puerto de Aveiro, obteniéndose una tasa de variación de -6,82 m/año (Tabla 5; Fernández-Fernández et al., 2019b).

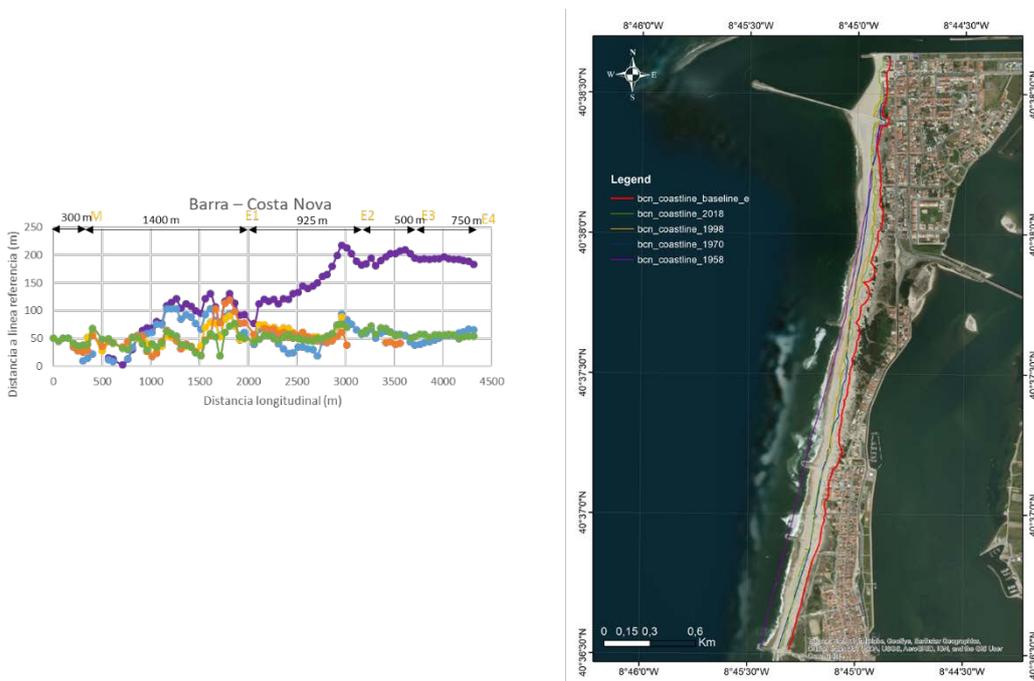


Figura 13. Evolución de la línea de costa (1958-2018) en el sector Barra- Costa Nova (NW Portugal). Nota: M-muelle sur (año de construcción no disponible), E-espigones (año de construcción 1972/1973) (modificado de Fernández-Fernández et al., 2019b).

Tabla 5. Valores medios de la tasa de variación de la línea de costa (m/año) estimados mediante el método del 'end point rate' para cada uno de los períodos.

	1958-1970	1970-1998	1998-2010	2010-2018	1958-2018
Barra-Costa Nova	-6,82	-0,04	+0,01	-0,40	-1,00

Este caso de estudio demuestra que la costa de Aveiro se ve afectada a corto plazo por eventos de temporal donde la respuesta depende de la configuración del sistema inicial, así como de la intensidad, duración y dirección de los eventos de temporal. En el presente caso, las playas más afectadas por la tormenta Adrián fueron las de Areão norte (P7) y Mira (P9). A medio plazo cobran importancia los efectos derivados de obras de defensa costera, donde se constata que el retroceso de la línea de costa después de las construcciones del muelle y de los espigones fue considerable.

4.1.3 Costa de Caminha a Espinho, Portugal

La evaluación de los riesgos costeros de erosión, rebase e inundación para la zona norte de Portugal se basó principalmente en la generación y análisis de MDE obtenidos a partir de levantamientos basados en fotografías aéreas. Además, se analizó también un Modelo Digital del Terreno (MDT), obtenido a partir de un levantamiento aéreo nacional efectuado con LiDAR en 2011, para estudiar la dinámica a medio plazo.

Los levantamientos topográficos se realizaron en noviembre de 2017 y en mayo de 2018, a lo largo de la costa Norte portuguesa entre Espinho y Caminha (ca. 90 km). La franja costera cubierta por las fotografías fue de aproximadamente 1 km de ancho, con un solapamiento del 80% (Figura 14), para asegurar un análisis fotogramétrico y extracción del MDE adecuadas. La toma de fotografías se realizó desde una pequeña aeronave equipada con una cámara digital fotogramétrica de alta resolución (9420 x 14430 píxeles), con una altitud de vuelo de 1900 m. Esta configuración resulta en una resolución sobre el terreno de aproximadamente 15 cm.

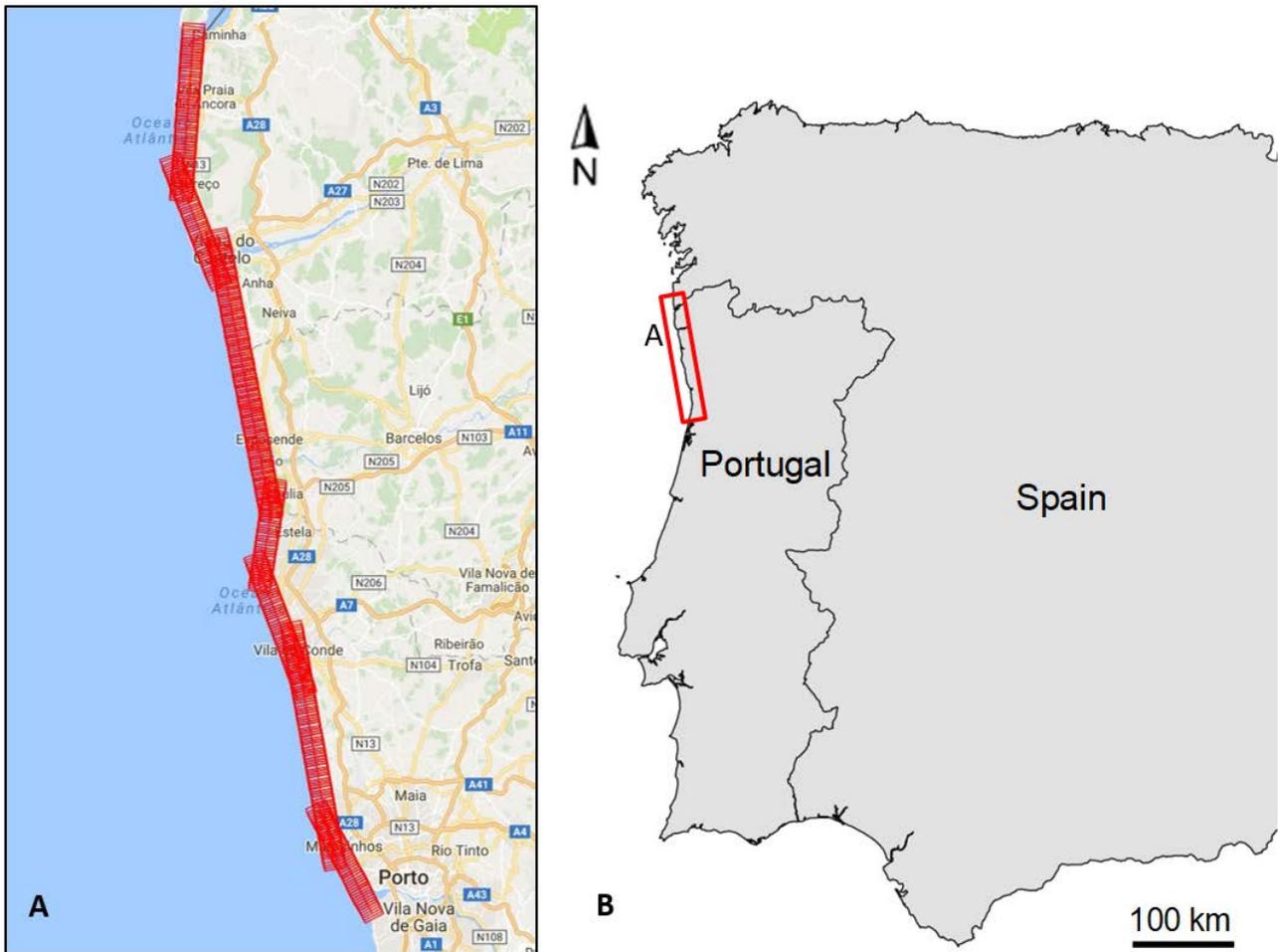


Figura 14. Plan de vuelo para la toma de fotografías aéreas (A) y localización del área de estudio (B).

En algunas áreas de estudio se llevaron a cabo levantamientos de mayor resolución mediante un Vehículo Autónomo No Tripulado (UAS – *Unmanned Autonomous Vehicle*), o un dron multirrotor equipado con una cámara fotográfica de 20 megapíxeles (Figura 15). Las fotografías se obtuvieron con suficiente superposición a una altitud de 60 a 120 m, correspondientes a una resolución sobre el terreno de 2 a 4 cm.

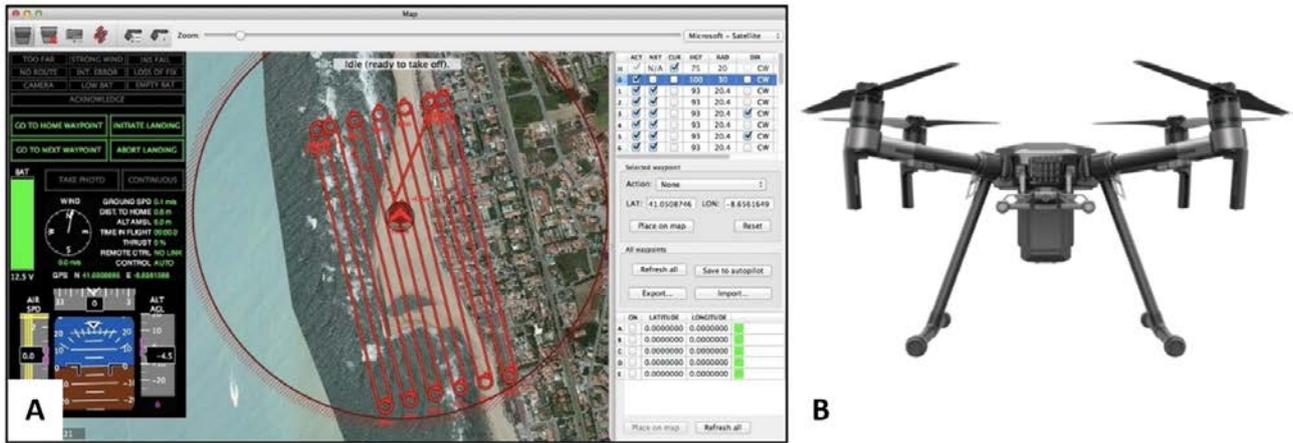


Figura 15. Plan de vuelo para la obtención de fotografías aéreas con UAV (A) e UAV DJI Matrice 200 (B).

El MDT obtenido en 2011 a partir de datos LiDAR fue proporcionado por el Instituto Geográfico Portugués, con una resolución de 1 m y una franja cubierta de 400 m (Figura 16). En cuanto a las fotografías aéreas, se analizaron con la aplicación *Agisoft Photoscan* que calcula el MDE a partir de nubes densas de puntos. Los levantamientos realizados desde avión permitieron obtener MDE con una resolución de 40 cm y una precisión vertical de un máximo de 20 cm (Figura 16). Los MDE derivados de los levantamientos realizados con el dron tienen una resolución menor de 10 cm y una precisión vertical de un máximo de 15 cm (Figura 16).

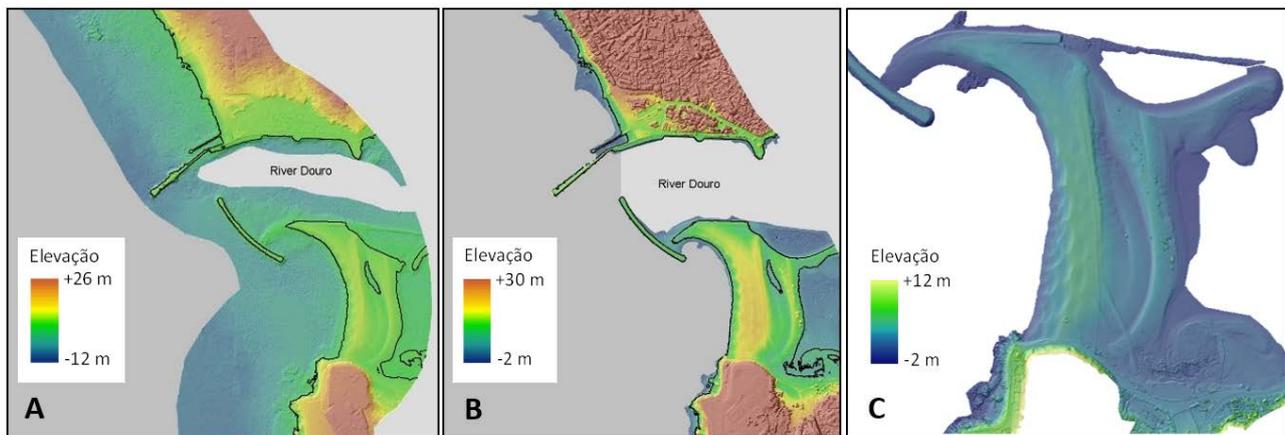


Figura 16. Ejemplos del MDT obtenido con LiDAR (A) y de MDE obtenidos a partir de fotografías aéreas obtenidas desde un avión (B) y con un UAV (C).

A partir del procesado de los MDE y del MDT en un GIS se extrajeron indicadores morfométricos y morfodinámicos de vulnerabilidad y de riesgo de erosión, rebase e inundación tal como se identificaron en el ámbito del proyecto MarRISK. Los análisis se realizaron para toda el área de estudio, así como agrupados por unidades administrativas y tipos de costa (arenosa, arenosa con afloramientos rocosos, rocas).

La línea de costa se refirió a la cota de 1,05 m, a partir de la cual se calculó la distancia entre la línea de costa de los diferentes levantamientos con el objetivo de determinar el avance o retroceso de la línea de costa en los distintos segmentos estudiados (Figura 17).



Figura 17. Ejemplo de la línea de costa extraída del MDT obtenido con LiDAR (rosa) y de los MDE obtenidos a partir de fotografías aéreas obtenidas con avión en 2017 (azul) y 2018 (naranja).

La línea de costa también se utilizó para determinar la orientación de cada segmento, al influir ésta en el impacto que el oleaje, las corrientes y el viento tiene en las playas. Se determinó el ancho y volumen de las playas a partir de los MDE y del MDT, para cada segmento. Su comparación entre los distintos levantamientos permitió determinar la existencia de erosión o acreción (Figura 18). A partir de perfiles topográficos perpendiculares a la costa (al menos un perfil por segmento) se determinó la altura máxima (de la playa o de la duna si está presente) y la pendiente (Figura 18).

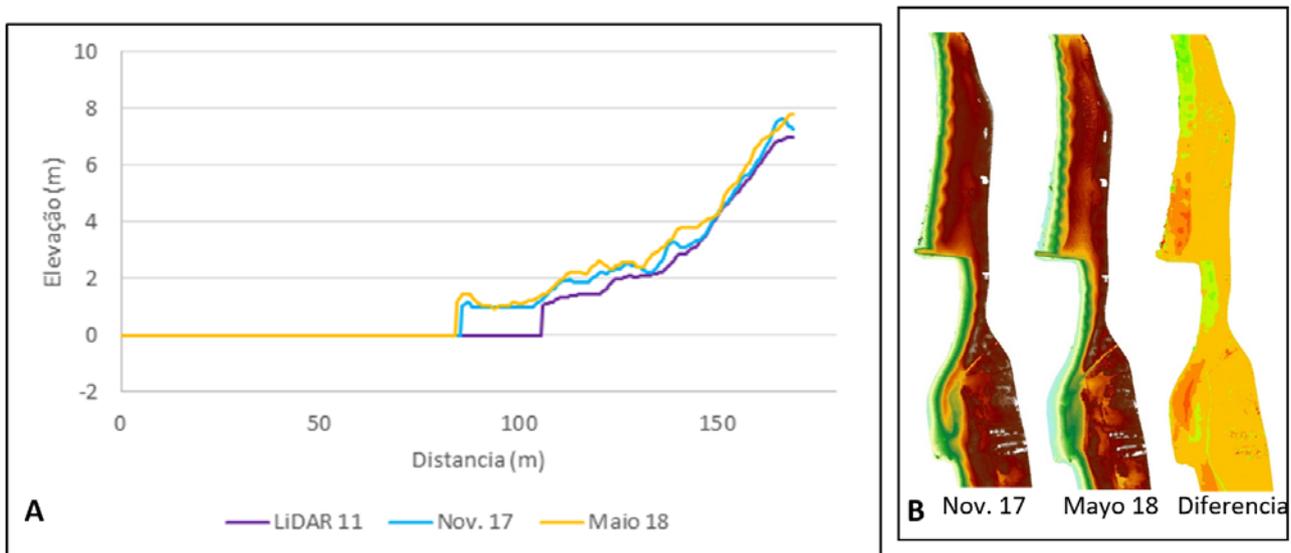


Figura 18. Ejemplo de perfiles para un segmento, trazados a partir del MDT obtenido con LiDAR y de los MDE obtenidos a partir de fotografías aéreas obtenidas con avión (A) y parte de los MDE de noviembre de 2017 y mayo de 2018, junto con su mapa de diferencias (B).

La metodología descrita ha permitido obtener ortofotografías aéreas de alta resolución, así como los indicadores morfométricos requeridos en el área de estudio y en el ámbito del proyecto

MarRISK. En relación a la morfodinámica, es decir, las alteraciones observadas entre levantamientos, se constató que el MDT (obtenido a partir de LiDAR) no es directamente comparable con los MDE obtenidos en el ámbito del proyecto. El MDT se filtra para eliminar la vegetación, las edificaciones, así como otros objetos que puedan interferir en el modelo digital. Como resultado, se observó que el MDT presenta una orografía suavizada, incluso en zonas rocosas, lo que indica que el proceso de filtrado suaviza también en parte el terreno.

Los datos obtenidos constatan la existencia de un aumento de volumen de un 10% para toda el área de estudio entre 2011 y 2017. El hecho de que ese aumento de volumen se observe en zonas vegetadas y rocosas sugiere que esta diferencia está explicada en mayor medida por diferencias metodológicas más que por una acreción real. Entre 2017 y 2018 se observó una disminución del volumen de las playas y de las dunas en el área de estudio, cuantificándose en aproximadamente un 2%.

4.2 Observación sistemática

Como alternativa a los muestreos sistemáticos, que son costosos en términos económicos y de personal, la aplicación de técnicas de análisis de imagen ha cobrado importancia en la actualidad. Las ventajas principales de estas técnicas son su amplia cobertura espacial y rapidez en la obtención de la información, en comparación con muestreos sistemáticos, más exactos y precisos, pero con menor cobertura espacial.

Las técnicas de análisis de la costa por imágenes experimentaron un impulso importante a partir de los años 80 (Harley et al., 2019). El uso de fotografías aéreas e imágenes de satélite ha sido y sigue siendo un recurso importante para el análisis de la evolución de áreas costeras. Entre las desventajas de esta metodología se encuentran su elevado coste inicial y recurrente en el caso de los vuelos, y la dificultad de obtener series temporales suficientemente largas y comparables. Son especialmente útiles para la evaluación de los cambios en los usos del suelo, así como en el estudio de la evolución de los ambientes costeros. En particular, su uso está muy extendido en la evaluación de cambios en la línea de costa, como medida de la erosión o acreción costera (e.g. Chaaban et al., 2012; Gómez-Pazo et al., 2019; Pérez-Alberti et al., 2012).

En las dos últimas décadas ha cobrado importancia el empleo de estaciones fijas de control óptico, que emplean generalmente videocámaras y algoritmos de procesamiento de imagen para la extracción de los parámetros de interés, entre los que destaca la localización de la orilla (Harley et al., 2019). Si bien estos sistemas han supuesto un salto cuantitativo en la monitorización de los sistemas costeros, con una frecuencia de actualización de la información imposible de alcanzar con muestreos convencionales, los costes de instalación y mantenimiento, así como los requisitos para su operatividad y protección han supuesto una limitación para su implantación generalizada.

Estas limitaciones pueden verse compensadas por la puesta en marcha recientemente de la iniciativa CoastSnap (Harley et al., 2019) basada en la colaboración ciudadana para obtener imágenes de las áreas costeras de interés gracias a la proliferación de teléfonos móviles equipados de cámaras. Los usuarios de los teléfonos móviles pueden tomar fotografías de la costa desde un soporte orientado y compartirla con los responsables de su análisis directamente o a través de redes sociales. Estas imágenes se procesan y rectifican a partir de los metadatos de la imagen y de puntos de control sobre el terreno para obtener imágenes georreferenciadas sobre las que luego se puede extraer la información deseada, como la posición de la orilla. En su estudio piloto en dos playas australianas, Harley et al. (2019) obtuvieron 400 imágenes en un período de 7 meses procedentes de 198 colaboradores voluntarios, lo que supone un promedio de 0.89 imágenes/playa/día. La mayor implantación y difusión de este método en la actualidad contribuirá a incrementar sensiblemente estas cifras.

5 Herramientas Predictivas

5.1 Mapas de Riesgo

Entre las herramientas más extendidas para la evaluación del riesgo costero se encuentran la confección de mapas de riesgo, que plasman en una base cartográfica los niveles de riesgo para distintos tramos de costa que comparten características similares. Estos mapas de riesgo son una de las herramientas más versátiles para su empleo por las autoridades responsables de la gestión costera, y en ellos se basan para la elaboración de políticas destinadas a la gestión de usos del suelo, desarrollo de infraestructuras, etc.

Los mapas de riesgo de erosión costera típicamente muestran una escala de riesgo cualitativa con niveles desde la ausencia de riesgo hasta el máximo riesgo. Se trata de mapas estáticos que cuantifican el riesgo existente en el momento de la construcción del mapa. Las limitaciones inherentes a esta metodología se palian en parte tomando en consideración lo que se denominan escenarios. Estos escenarios pueden contemplar cualquier tipo de situación previsible. Entre los más habituales se encuentran los escenarios que consideran distintos horizontes temporales. En ellos se consideran las condiciones esperadas a distintas fechas, teniendo en consideración las variaciones esperadas en las variables que determinan el riesgo, como la peligrosidad ocasionada por los fenómenos naturales o los cambios en la vulnerabilidad y/o exposición como consecuencia de las previsiones de aumento poblacional, desarrollo urbanístico o acciones encaminadas a la protección costera. En el caso concreto del proyecto MarRISK, los escenarios que se contemplan son el futuro próximo, hasta el año 2030, el futuro a medio plazo, para el período 2030-2050, y el futuro a largo plazo, para el 2050-2100. En relación a los escenarios, es habitual igualmente tener en cuenta distintos grados de severidad en la peligrosidad, considerando eventos extremos que estadísticamente se producen con una cierta recurrencia, que

se denomina período de retorno. Entre los períodos de retorno considerados habitualmente se encuentran 100 y 500 años.

La generación de mapas de riesgo se basa en al menos dos componentes. Una cartografía de la amenaza, y una estimación de la consecuencia de ese peligro en todos aquellos aspectos del medio físico, ecológico y socioeconómico que puedan verse afectados. Si bien la valoración de estos parámetros sería deseable que fuera objetiva y cuantitativa, esto no siempre es posible o viable. En muchos casos se reducen las dimensiones involucradas en la construcción de estos mapas a índices fácilmente interpretables y que pueden emplearse en otro tipo de análisis fácilmente. En este sentido son múltiples los índices que se pueden encontrar en la literatura en relación a la evaluación de riesgos costeros, generalmente en cuanto a vulnerabilidad se refiere (e.g. Alexandrakis y Poulos, 2014; Ferreira et al., 2017; Fitton et al., 2018; McLaughlin y Cooper, 2010; Satta et al., 2016; Torresan et al., 2010), si bien muchos de los citados son evoluciones del Coastal Vulnerability Index propuesto por Gornitz et al. (1994). Una de las desventajas de estos índices es que suelen incorporar un cierto grado de subjetividad, siendo habitual recurrir al denominado consenso de expertos, y suelen estar condicionados por factores locales difícilmente generalizables (e.g. Narra et al., 2018; Satta et al., 2016; Viavattene et al., 2018).

Como ventajas de los mapas de riesgo se pueden citar su fácil interpretación por parte de las autoridades responsables de la gestión costera y de la sociedad en general, pudiendo incorporarse fácilmente estos mapas a los cada vez más numerosos portales de Infraestructuras de Datos Espaciales de los Organismos Públicos.

En el ámbito del proyecto MarRISK se llevó a cabo la elaboración de mapas de indicadores de vulnerabilidad para las zonas de estudio, que incluyen la playa de Patos, en España, y el trecho que abarca desde Caminha a Espinho, y otro al sur de Aveiro, ambos en Portugal. Los mapas producidos (Figura 19), representan la vulnerabilidad de los distintos polígonos valorados atendiendo a sus características unificadoras, en una escala cualitativa con tres niveles: vulnerabilidad baja, moderada y elevada.

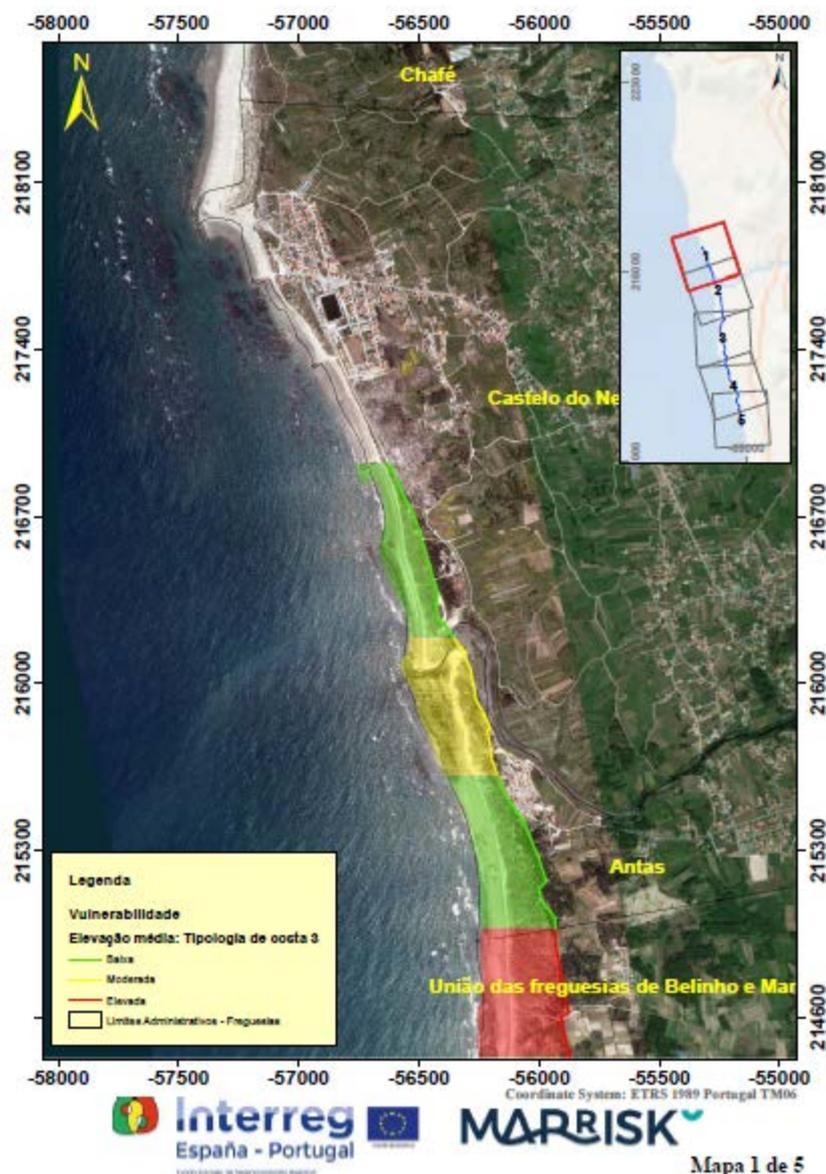


Figura 19. Ejemplo de mapa de vulnerabilidad asociada al indicador elevación media generado en el ámbito del entregable 2.3 del proyecto MarRISK.

Otras metodologías combinan los factores de vulnerabilidad que se consideran relevantes para el riesgo analizado y en la región estudiada, en un único indicador de síntesis. La ventaja de este planteamiento es su sencillez tanto en su representación como en su interpretación por parte de los agentes interesados no expertos. Como ejemplos de esta aproximación se pueden citar el Beach Vulnerability Index (Alexandrakis y Poulos, 2014), concebido como una aproximación numérica y holística al tener en cuenta los principales procesos físicos que controlan la evolución de un sistema de playa, integrados en un único indicador de vulnerabilidad con 5 clases en función de la distribución estadística de frecuencias obtenidas (Figura 20). En general, este tipo de metodologías tienen la desventaja de que la construcción de los índices se ajusta a la casuística particular de las zonas de estudio o de los objetivos de la investigación.

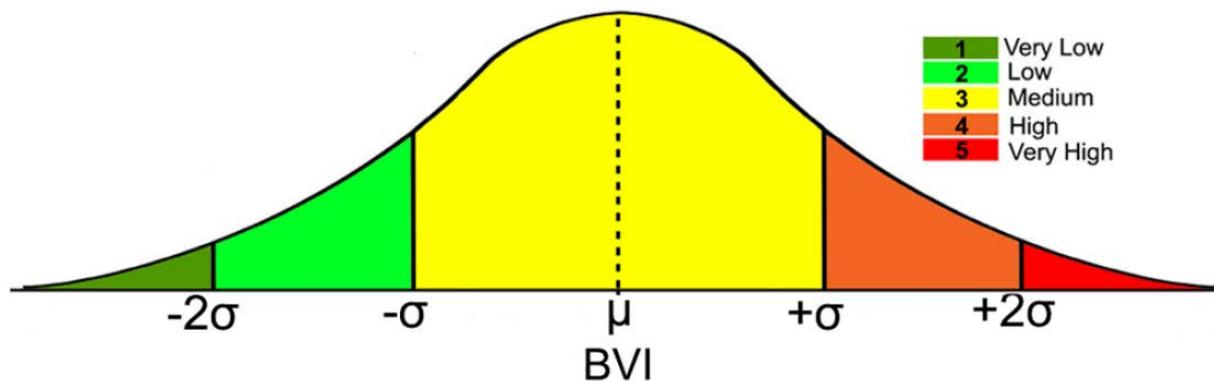


Figura 20. Clasificación del BVI en función del valor promedio y variabilidad de su distribución estadística (figura tomada de Alexandrakis y Poulos, 2014).

5.2 Formulaciones empíricas y simulaciones numéricas

Si bien la obtención de datos de campo es importante para diagnosticar el estado del sistema en estudio y la tendencia histórica, la capacidad de cuantificar el riesgo potencial bajo distintas condiciones es de gran valor añadido. La aproximación más sencilla para este análisis es la proyección en el tiempo de las tendencias actuales observadas, o en el caso de tratar de cuantificar el impacto de diferentes condiciones ambientales, la extrapolación de medidas bajo diferentes condiciones. En ocasiones, también es posible el empleo de formulaciones empíricas como la regla de Bruun para el retroceso de la línea de costa causado por el reajuste del perfil de equilibrio de una playa como consecuencia del aumento del nivel del mar (Bruun, 1962; 1988), o estimaciones del balance sedimentario (Rosati, 2005). Esta última aproximación requiere conocer los flujos de entrada y salida de sedimento en la región costera estudiada, y tiene en cuenta los cambios de volumen experimentados por la misma. La obtención de estos parámetros es compleja, y en general depende en gran medida del transporte longitudinal de sedimentos, ya que el transversal se considera que es el más sujeto a la variación estacional y por tanto permanece en gran medida dentro del sistema. Las tasas de transporte longitudinales pueden medirse con una diversidad de métodos (por ejemplo, con trampas de sedimentos, medidas de velocidad y sedimento en suspensión, trazadores, indicadores morfológicos, Fernández-Fernández et al., 2016), o estimarse a partir de fórmulas empíricas que dependen de las características del olaje en la rompiente y de la morfología de la zona de estudio (e.g. Komar & Inman, 1970; CERC, 1984; Kamphuis, 1991; Bayram et al., 2007; Van Rijn, 2014). Las desviaciones típicamente resultantes de estas fórmulas empíricas pueden minimizarse mediante la recalibración de sus coeficientes, que permite mejorar estos resultados hasta reducirlos a un máximo de un factor 2 (Mil-Homens et al., 2013), como ha comprobado Fernández-Fernández et al., (2016) en la playa de Ofir, dentro de las zonas de estudio portuguesas del proyecto MarRISK.

Con un mayor grado de complejidad, el transporte sedimentario y los cambios volumétricos asociados pueden simularse mediante el empleo de modelos numéricos. En general, existen tres tipos de modelos para la simulación de la evolución de la costa bajo unas condiciones de oleaje, marea, viento y morfología determinadas: modelos de perfil, modelos de línea de costa, y modelos de área costera (Roelvink y Reniers, 2012). Éstos últimos pueden ser de dos dimensiones horizontales (2DH), o simular procesos en 3 dimensiones (3D). El primer tipo de modelos tiene como objetivo simular cambios en dirección transversal a la playa, e ignoran los procesos longitudinales. El segundo tipo de modelo predice los cambios en la línea de costa, asumiendo que los perfiles transversales se conservan. El último tipo de modelos tiene en cuenta los cambios en los perfiles y la línea de costa, lo que incrementa su complejidad y sus demandas computacionales.

Las aplicaciones de los dos primeros tipos de modelos son limitadas en cuanto al tipo de procesos que pueden simular y las escalas a las que son aplicables. Los primeros se suelen aplicar a la evaluación del impacto de tormentas en los perfiles de playa, o el comportamiento de barras arenosas. El segundo tipo se emplea para simular cambios en la morfología de la costa a grandes escalas espaciales y temporales, como por ejemplo realineamientos de la costa con cambios en el clima marítimo o la evolución de deltas (Roelvink y Reniers, 2012).

El tercer tipo de modelos lleva a cabo una simulación holística, considerando un amplio conjunto de forzamientos y parámetros, así como su interrelación. Aunque existe una variedad de modelos con características, implementaciones y funcionamiento distinto (Tabla 6); dos de los más empleados para la estimación de la erosión costera son Delft3D (Deltares, 2014) y XBeach (Deltares, 2019a; Roelvink et al., 2010). Delft3D consta de una serie de módulos independientes pero acoplables, con aplicaciones específicas. Permite simular la hidrodinámica de ambientes costeros, el transporte de sedimentos y la evolución de la morfología del fondo, la propagación del oleaje mediante una interfaz de simulación integrada con el modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*; Booij et al., 1999; Deltares, 2019b) y la calidad del agua. Simula las corrientes de marea, las corrientes generadas por la acción del viento, la morfodinámica costera y fluvial, el transporte de contaminantes y las corrientes inducidas por gradientes de densidad (transporte de calor y salinidad).

La propagación del oleaje se basa en el modelo espectral SWAN permite la simulación de la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa, teniendo en cuenta los fenómenos de generación, disipación e interacción de grupos de olas y los procesos asociados a su propagación. Además, también permite la simulación de procesos del oleaje en aguas costeras, como la rotura del oleaje inducida por el fondo, la disipación de la energía por fricción con el fondo, y la interacción entre grupos de olas. Este programa utiliza esquemas numéricos implícitos, basados en el método de diferencias finitas. Además de la definición de las mallas de discretización la simulación requiere la prescripción de condiciones de contorno que pueden establecerse a partir de

resultados obtenidos con modelos de aguas profundas, como WAM o WAVEWATCH III (Tolman, 2002) que simulan la propagación del oleaje a escala oceánica. El modelo también permite la simulación de estos fenómenos con mallas anidadas con diferente resolución. En este caso los resultados obtenidos con las mallas regionales servirán de condiciones de contorno para las mallas locales, anidadas en la malla regional.

Tabla 6. Características técnicas de algunos de los modelos numéricos empleados en la simulación de cambios morfodinámicos en la costa.

Modelo	Condiciones de oleaje	Modelo hidrodinámico	Transporte sedimentario	Método de actualización de la morfología	Disponibilidad
Delft3D	Promedio de oleaje espectral Promedio de oleaje de onda corta	2DH/3D	2DH/3D Arena y fango	En línea con <i>morfac</i> , en línea en paralelo	Código abierto
Mike21	Espectral Ecuación parabólica/ pendiente moderada	2DH/Q3D	2DH/3D Arena y fango	Fuera de línea, en línea con <i>morfac</i>	Bajo licencia
Telemac	Espectral	2DH/3D	2DH/Q3D	Fuera de línea, sin aceleración	Bajo licencia
ADCIRC	Espectral	2DH/3D	2DH/3D	En línea	Bajo licencia
ROMS-SED	Espectral	3D	3D	En línea con <i>morfac</i>	Código abierto
XBeach	Promedio de oleaje espectral Promedio de oleaje de onda corta	2DH	Q3D	En línea con <i>morfac</i>	Código abierto

Tabla modificada de Roelvink y Reniers (2012).

En el caso de la simulación de la erosión costera, los módulos de utilidad son el WAVE, para la simulación de la propagación del oleaje, el FLOW, para la simulación hidrodinámica forzada por la marea y meteorología, el transporte de sedimentos no cohesivos como carga de fondo y en suspensión, así como de sedimentos cohesivos en suspensión. El módulo MOR (Morphology), se apoya en el FLOW para calcular transportes sedimentarios y actualizar la morfología del fondo a partir de estos resultados (Deltares, 2014).

Algunos ejemplos del uso de los diferentes módulos de Delft3D para la evaluación de la erosión son la estimación del transporte sedimentario y cambios morfodinámicos en el delta del Mekong (Tu et al., 2019), la predicción a escala decadal de cambios en el estuario del río Yangtze (Luan et al., 2017), o la evaluación del efecto de las tormentas e inundaciones en el delta del Ródano (Boudet et al., 2017). Delft3D también se emplea para optimizar el diseño de acciones de protección, como las regeneraciones de playas, para minimizar su erosión (Tonnon et al., 2018), o evaluar el efecto de estas acciones (Barnard et al., 2009).

La modelización de cambios en playas, especialmente en relación con tormentas, a escalas espaciales y temporales más cortas suele llevarse a cabo con el modelo XBeach, que generalmente está acoplado o recibe datos de las condiciones de contorno proporcionadas por otros modelos como Delft3D, especialmente en relación a la propagación del oleaje. Este modelo es capaz de simular la hidrodinámica costera resultante de la propagación del oleaje, que incluye la propagación del oleaje, su rotura, avance y rebase de las dunas, el transporte sedimentario y la consecuente evolución del fondo y erosión de las dunas frontales (Roelvink et al., 2018). Como ejemplos de aplicación de este modelo para la evaluación de la erosión en playas y dunas cabe citar la evaluación de este riesgo en un escenario de subida del nivel del mar en el Mediterráneo (Enríquez et al., 2019), o la evaluación de la sensibilidad a las tormentas de un delta con una costa muy curvilínea (Sanuy y Jiménez, 2019). Otros trabajos emplean XBeach para evaluar el impacto de tormentas, en conjunto con otros modelos como Delft3D para proporcionar condiciones de contorno o como parte de un esquema de anidamiento de mallas y modelos para llevar a cabo un “downscaling” optimizado (Dissanayake et al., 2014; Yin et al., 2019). En este sentido, la implementación adecuada de estos modelos, así como de las fuentes de datos que aportan las condiciones de contorno puede dar lugar a la construcción de un marco operacional determinístico que facilite la toma de decisiones a los servicios de emergencias y a los gestores costeros bajo escenarios de tormentas extremas, como por ejemplo el Coastal Storm Modeling System (CoSMoS) desarrollado en California, EE.UU. (Barnard et al., 2014).

XBeach también se ha empleado para evaluar el papel protector de la costa que presenta la instalación de infraestructuras para la obtención de energía undimotriz en el sur de España (Bergillos et al., 2013).

Recientemente han ido cobrando importancia otros planteamientos probabilísticos, que combinan los resultados de simulaciones con modelos Bayesianos, para obtener la probabilidad de distintos resultados posibles, y así servir como aproximación menos costosa desde el punto de vista computacional y de grado de experiencia de los gestores a los esquemas de reducción de riesgo de las zonas vulnerables (Jäger et al., 2018; Plomaritis et al., 2018).

En el ámbito de este proyecto se evaluaron modelos específicos para simular la evolución de la hidrodinámica y la morfodinámica de playas bajo diferentes escenarios con el propósito de operacionalizar estos modelos como herramientas de previsión y alerta ante eventos extremos. A continuación se presenta esta evaluación junto con los casos de estudio analizados en el entorno de las desembocaduras de los ríos Miño y Lima, y las playas de Moledo y Cabedelo.

5.2.1 Modelización hidrodinámica en el noroeste de Portugal

Esta sección contiene la contribución de la Universidade do Minho al entregable 3.6, en la que se describen las herramientas de modelado aplicadas a los casos de estudio contemplados dentro del proyecto MarRISK. Se presentan los modelos desarrollados a lo largo del proyecto y los resultados ilustrativos de su aplicación en sectores de la costa Noroeste portuguesa.

Para la aplicación integrada del modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore; Booij et al., 1999; Deltares, 2019a) se desarrolló un modelo regional de la zona costera Atlántica de la Península Ibérica y modelos locales de zonas costeras adyacentes a los estuarios de los ríos Miño y Lima. También se implementaron modelos morfodinámicos uni y bidimensionales de las playas de Moledo y de Cabedelo a través de la aplicación del modelo XBeach.

La metodología seguida consistió en la implementación de un modelo regional y dos modelos locales de propagación del oleaje mediante el modelo SWAN. Los modelos locales, con mayor resolución espacial, se implementaron con el modelo Delft3D, que permite la simulación integrada de las corrientes inducidas por la marea y por el forzamiento del viento, además de la propagación del oleaje, consiguiendo así simular la hidrodinámica costera de las zonas de estudio. El modelo regional emplea como condiciones de contorno los espectros de oleaje resultantes de simulaciones realizadas con el modelo oceánico WAVEWATCH III (WWIII), combinados con información referente a los campos de viento y presión atmosférica de la base de datos Europea ECMWF (Dee et al., 2011). Con esta metodología se consigue el *downscaling* de los resultados de propagación del oleaje derivados de los modelos a escala regional y de los modelos locales implementados para las desembocaduras de los ríos Lima y Miño. Los espectros resultantes de este *downscaling* en los modelos locales se emplean como condiciones de contorno para los modelos costeros implementados en XBeach, que permiten simular los procesos hidrodinámicos y morfodinámicos en las playas (playa y duna frontal).

En la Figura 21 se representa la localización y discretización espacial de los modelos implementados.

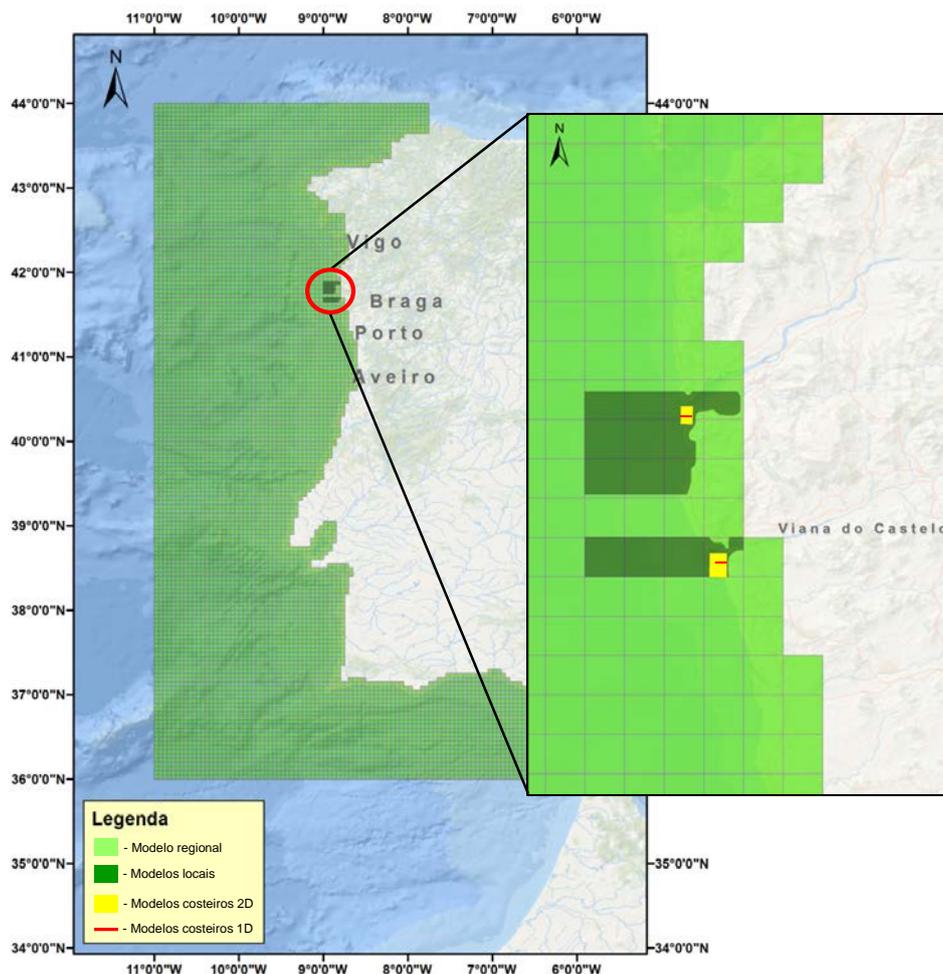


Figura 21. Ámbito espacial y discretización del modelo regional, de los modelos locales y de los modelos en playas (costeros).

La implementación del modelo regional SWAN se realizó con una malla de $0,05^\circ$ de resolución cuyas coordenadas exteriores en el Norte son 11°W ; 44°N a 7°W ; 44°N y a Sur 11°W ; 36°N a 6°W ; 36°N , y una batimetría GEBCO (GEBCO, 2018). La información de vientos y presión atmosférica se obtuvo de la base de datos del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas.

En la Figura 22 se presentan los resultados obtenidos con el modelo regional para una simulación de la propagación del oleaje para el año 2004. Se representan las rosas de oleaje para diferentes localizaciones a lo largo de la costa NO de la Península Ibérica.

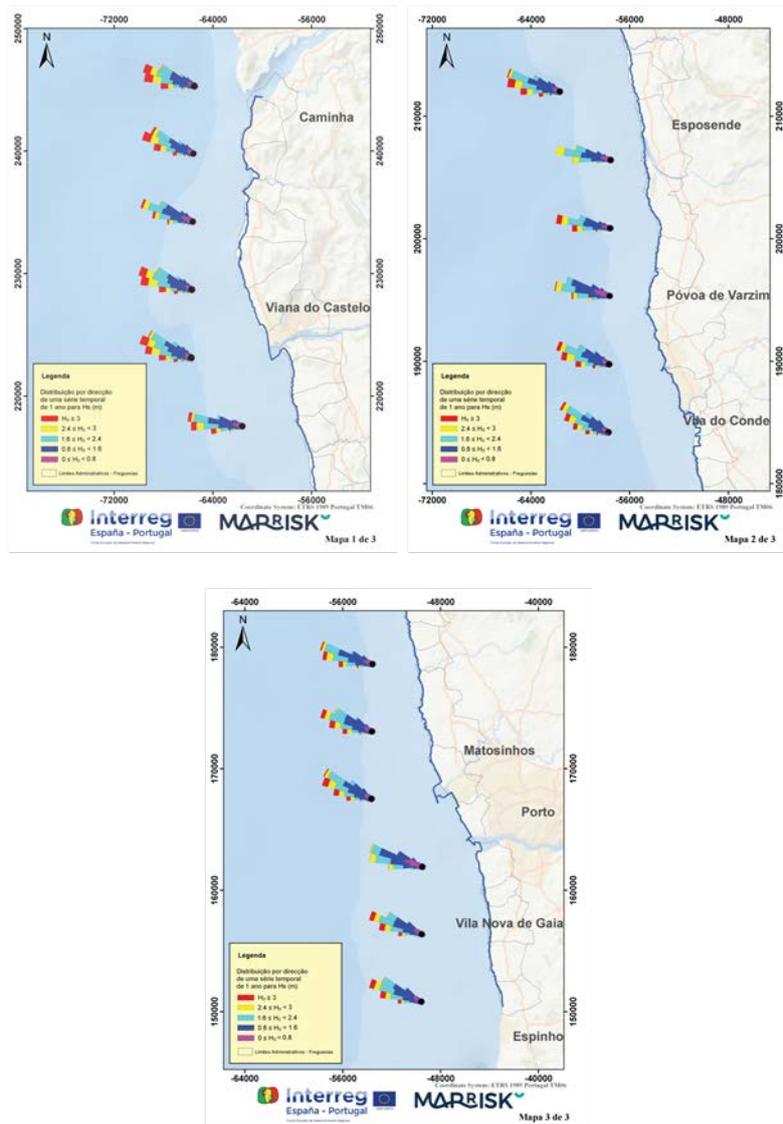


Figura 22. Rosas de oleaje en la costa noroeste de Portugal obtenidas a partir de los resultados del modelo regional para el año 2004.

Los modelos locales SWAN-Delft3D, de elevada resolución espacial (50 m), permiten simular la intensidad de las corrientes y los niveles del mar, así como la propagación del oleaje en las zonas costeras seleccionadas como zonas de estudio. Se implementaron para las zonas costeras adyacentes a los estuarios de los ríos Miño y Lima. Las batimetrías empleadas se obtuvieron mediante levantamientos batimétricos, y complementadas con datos LiDAR y datos batimétricos GEBCO para las zonas más profundas.

El modelo local de la zona adyacente al río Miño está delimitado por las coordenadas 9,000°W; 41,885°N, 8,810°W; 41,885°N, 8,870°W; 41,755°W y 9,000°W; 41,755°N. El modelo local de la zona próxima al río Lima está delimitado por las coordenadas 9,000°W; 41,700°N, 8,800°W; 41,700°N, 8,820°W; 41,650°W y 9,000°W; 41,650°N.

Los resultados del modelo regional se emplearon como condiciones de contorno en los modelos locales, y como forzamientos, los campos de viento y presión atmosférica obtenidos de la base de datos del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas.

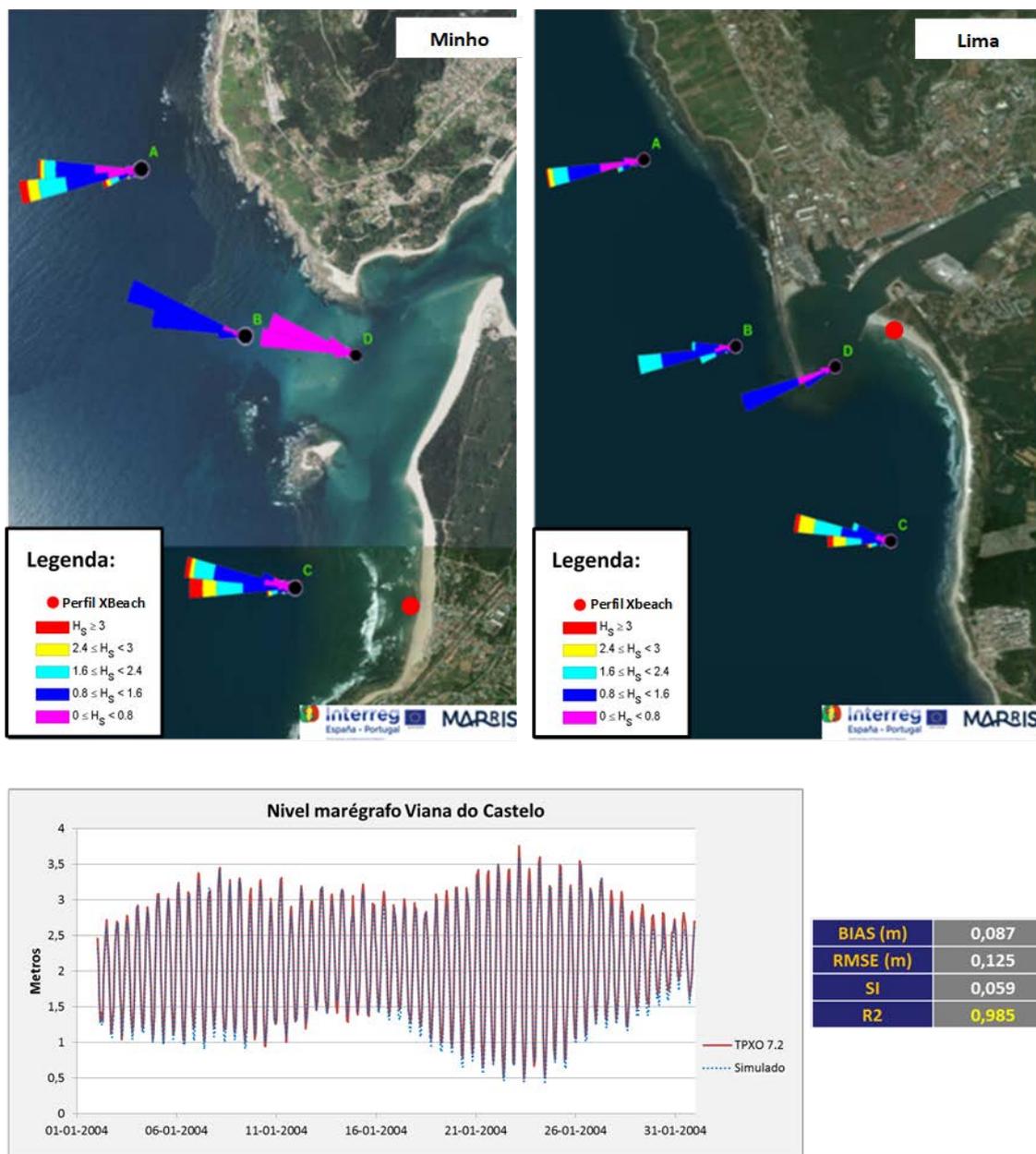


Figura 23. Rosas de oleaje en las áreas de estudio de los ríos Miño (panel superior izquierdo) y río Lima (panel superior derecho) obtenidas para la simulación del evento de oleaje más intenso del años 2004 y comparativa entre niveles simulados y observados en Enero de 2004 en el mareógrafo de Viana do Castelo (panel inferior izquierdo) junto con la cuantificación de la efectividad de los niveles simulados en esta localización (panel inferior derecho).

Los resultados de la cuantificación del régimen de oleaje se representan en forma de una rosa de oleaje para cuatro localizaciones correspondientes a las áreas de estudios de los modelos locales. También se presenta una comparativa entre los niveles simulados y previstos a partir del

modelo global de marea TPXO 7.2 (Egbert y Svetlana, 2002) definido con base en las observaciones del mareógrafo de Viana do Castelo (Figura 23). Las localizaciones A, B y C se encuentran a 500 m de la cota batimétrica correspondiente al nivel medio del mar (-2 m respecto al datum portugués); las localizaciones señaladas como D se encuentran en las desembocaduras de los ríos Lima y Miño.

El oleaje incidente sufre alteraciones significativas en su aproximación a la costa, con variaciones espaciales significativas en términos de direcciones de propagación y alturas significativas. Los resultados obtenidos con los modelos locales permiten determinar las condiciones de contorno de los modelos morfodinámicos implementados con el software XBeach para las zonas de estudio en las playas de Moledo (en la franja costera adyacente al estuario del río Miño) y la playa de Cabedelo (en la zona costera adyacente al estuario del río Lima).

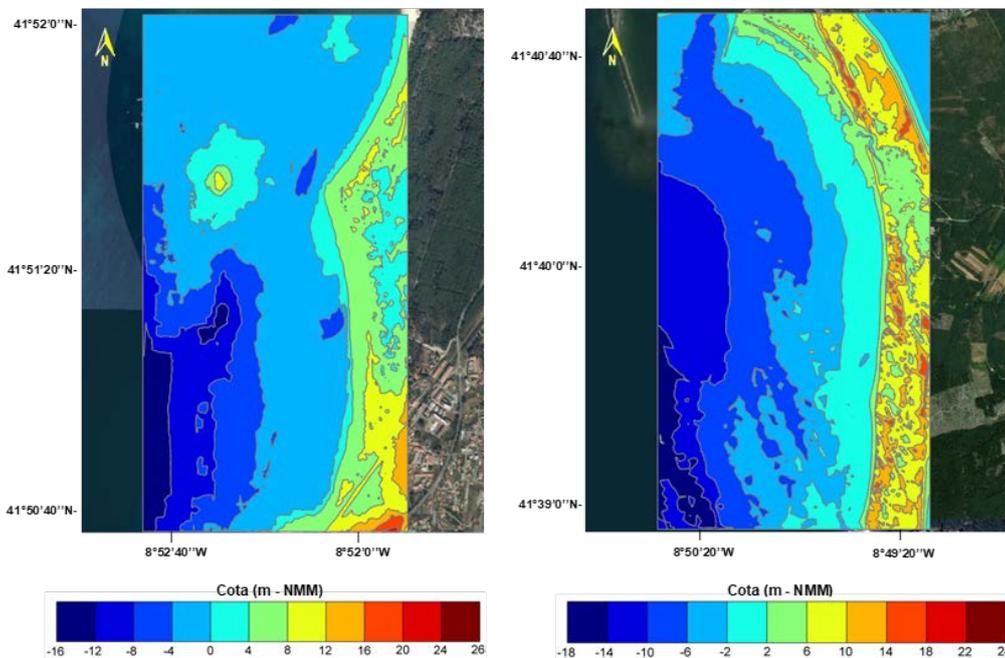
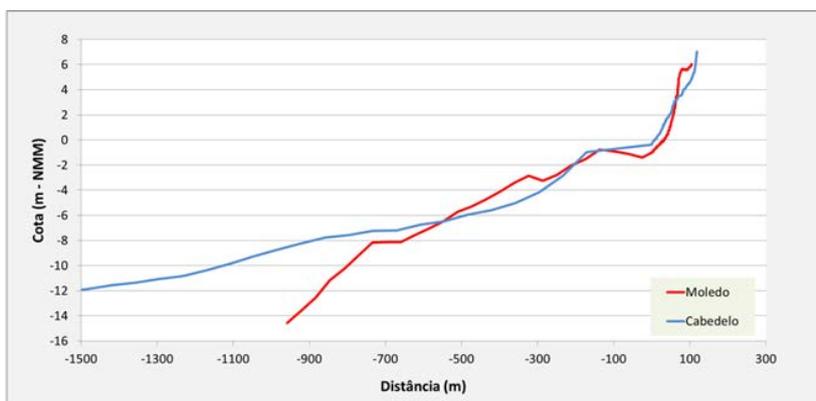


Figura 24. Perfiles empleados en la construcción de los modelos XBeach de las playas de Moledo y Cabedelo (panel superior) e información topobatemétrica utilizada con los modelos XBeach bidimensionales en las zonas costeras adyacentes a los estuarios de los ríos Miño (panel inferior izquierdo) y Lima (panel inferior derecho).

Los modelos costeros XBeach se implementaron en perfiles seleccionados en cada una de las playas (modelos unidimensionales) y en zonas costeras adyacentes a los estuarios del Miño y el Lima (modelos bidimensionales) (Figura 24). Para la construcción de estos modelos se llevó a cabo una campaña de recogida de datos topográficos de las playas emergidas así como de muestras de sedimentos para su análisis granulométrico. La información batimétrica empleada se obtuvo mediante levantamientos topográficos disponibles para las zonas de estudio complementados con batimetrías LiDAR.

Para ilustrar las capacidades de simulación de los modelos XBeach 1D implementados se seleccionó el evento de tormenta de mayor intensidad del año 2004 (el 8 de Enero). Se consideraron cinco escenarios diferentes de simulación: el escenario 1 simula la tormenta con el nivel del mar observado; el escenario 2 simula los efectos de la tormenta en caso de que se hubiese producido durante la pleamar; los escenarios 3 a 5 tienen en consideración las proyecciones RCP del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) de valores extremos de nivel del mar (Vousdoukas et al., 2017). Los niveles considerados se corresponden con los valores estimados para períodos de retorno de 100 años (Tabla 7) e incluyen el efecto de la marea astronómica, de la sobreelevación meteorológica y de la acumulación de agua en la costa por efecto del oleaje (*wave setup*).

Tabla 7. Indicadores utilizados en trabajos de evaluación de vulnerabilidad costera.

	Niveles extremos del mar (m)		
	Históricos	RCP 4.5 2050	RCP 8.5 2050
Escenario 1	0.2	-	-
Escenario 2	1.3	-	-
Escenario 3	3.0	-	-
Escenario 4	-	3.2	-
Escenario 5	-	-	3.2

Como resultado de estas simulaciones se obtienen niveles máximos y mínimos para los diferentes niveles del mar con una tormenta con características idénticas a la más intensa del año 2004. Las envolventes de estos niveles para las playas de Moledo y Cabedelo se presentan en la Figura 25 y Figura 26, respectivamente.

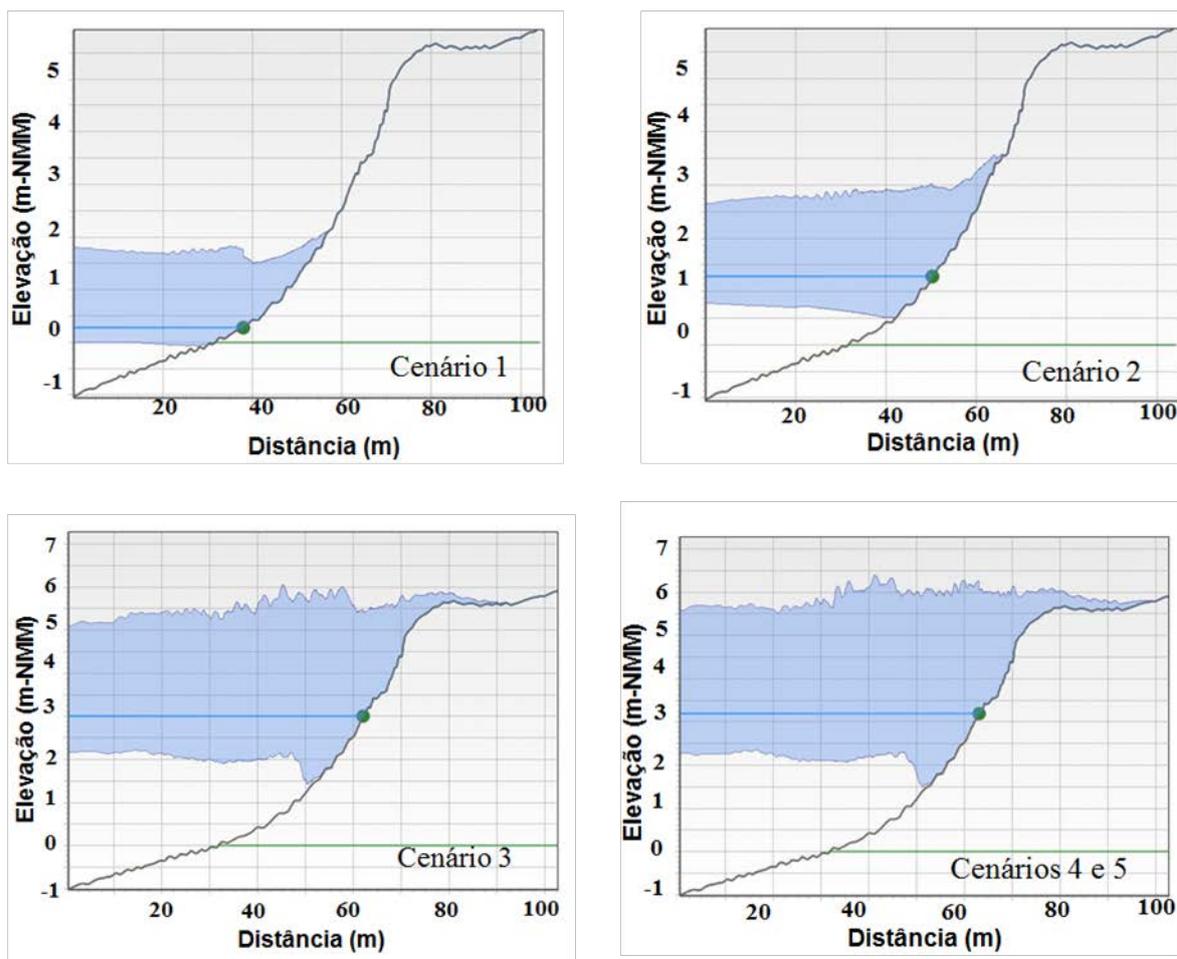


Figura 25. Resultado de las simulaciones de niveles extremos para las playa de Moledo en los cinco escenarios considerados (la línea azul representa el nivel extremo del mar).

Los resultados obtenidos permiten verificar que los niveles extremos, cuando ocurren simultáneamente con oleajes intensos, provocan rebases que son evidentes en los resultados de las simulaciones obtenidas para la playa de Moledo. La playa de Cabedelo es menos vulnerable a este tipo de situación, con las condiciones y ubicación analizadas, debido a la protección proporcionada por los rompeolas de la desembocadura del río Lima. Estos resultados no tienen en consideración posibles alteraciones morfodinámicas que puedan modificar las condiciones de inundabilidad (Granja et al., 2014; Pinho y Granja, 2018).

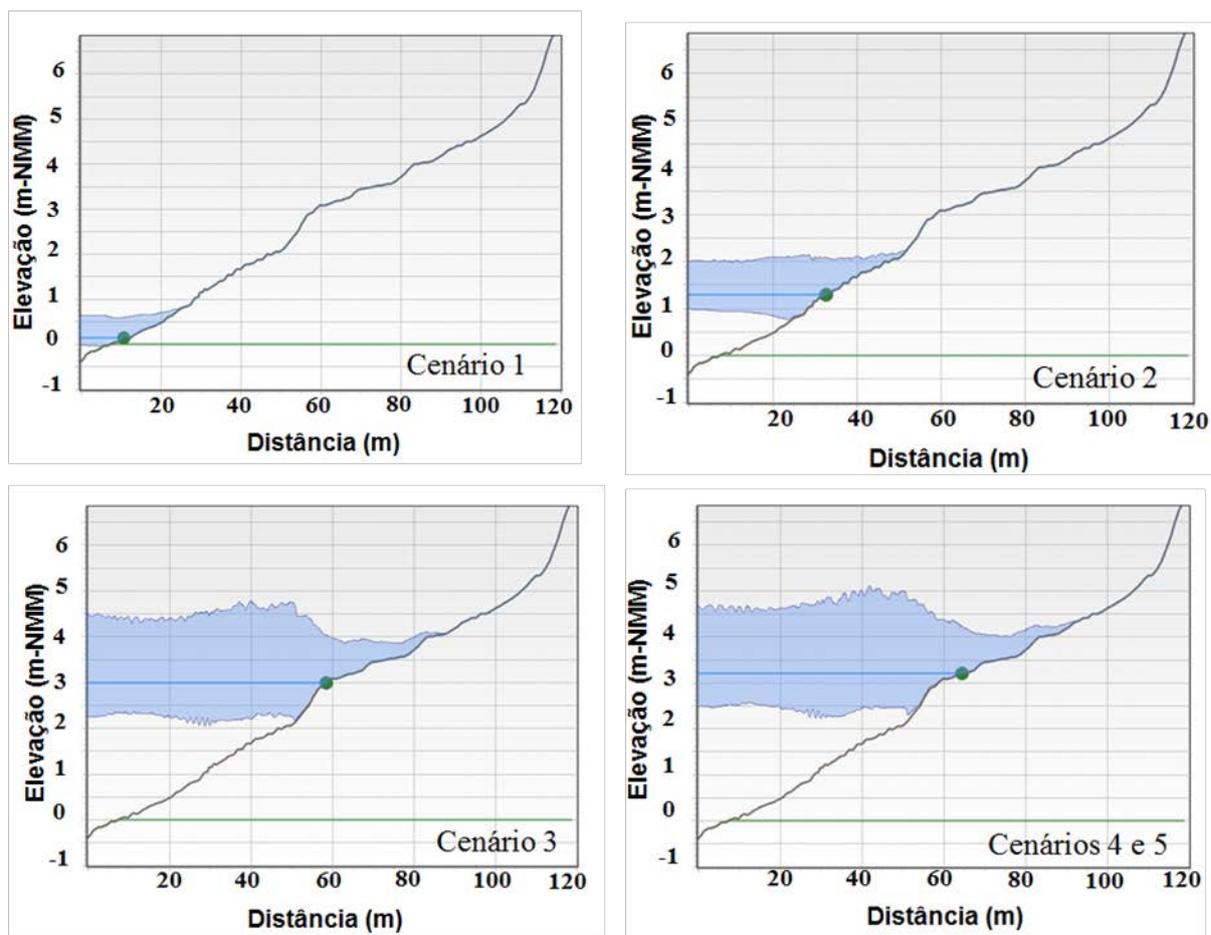


Figura 26. Resultado de las simulaciones de niveles extremos para la playa de Cabedelo en los cinco escenarios considerados (la línea azul representa el nivel extremo del mar).

De igual manera que con los modelos 1D, se construyeron modelos XBeach bidimensionales (2D) para simular el evento de tormenta intensa del 8 de Enero de 2004. Estos modelos de elevada resolución espacial (5 m x 5 m) se implementaron para las zonas costeras adyacentes a los estuarios de los ríos Miño y Lima. El modelo bidimensional de la zona adyacente al río Miño está delimitado por las coordenadas 8,879°W; 41,867°N, 8,864°W; 41,867°N, 8,864°W; 41,844°N y 8,879°W; 41,844°N. El modelo bidimensional de la zona adyacente al río Lima está delimitado por las coordenadas extremas 8,843°W; 41,681°N, 8,821°W; 41,681°N, 8,821°W; 41,649°N y 8,843°W; 41,649°N. Los resultados de niveles máximos para la tormenta se presentan para dos escenarios de simulación: (i) tormenta con el nivel del mar observado; y (ii) tormenta ocurrida con los niveles extremos del mar en 2050 para RCP 4.5 y RCP 8.5 (Figura 27).

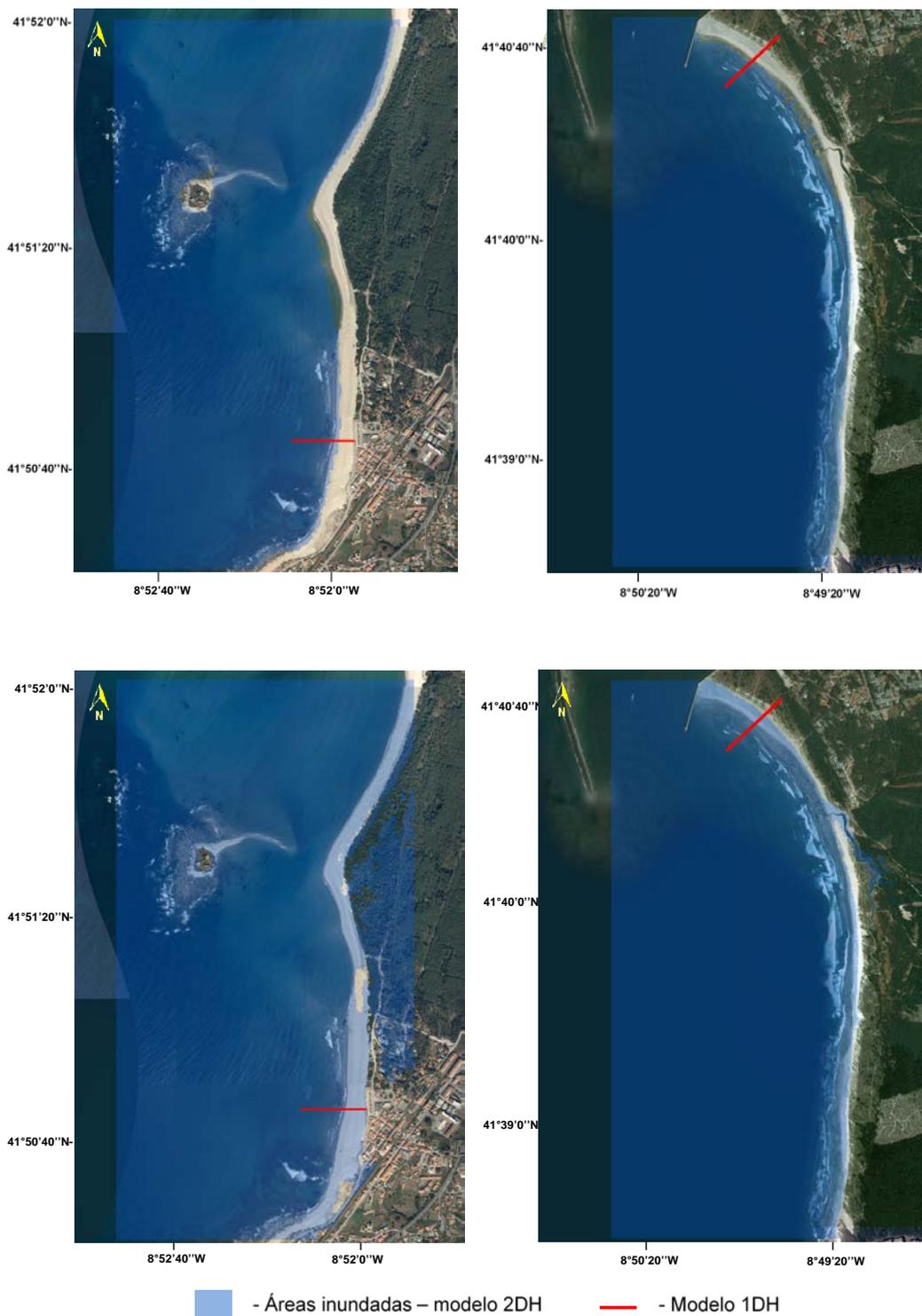


Figura 27. Resultado de áreas inundadas en el evento de tormenta del 8 de Enero de 2004 en las zonas costeras adyacentes a los estuarios de los ríos Miño (panel superior izquierdo) y Lima (panel superior derecho) y resultado de niveles para las proyecciones en 2050 de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en las zonas costeras adyacentes a los estuarios de los ríos Miño (panel inferior izquierdo) y Lima (panel inferior derecho).

Los modelos implementados, una vez calibrados y validados, son herramientas de elevado potencial para la previsión a corto plazo de las consecuencias de eventos extremos. Para ello, deben explorarse las diferentes fuentes de información referentes a previsiones meteorológicas que pueden ser utilizadas para el forzamiento de estos modelos.

La operacionalización de los modelos implementados en el ámbito de la actividad desarrollada se llevó a cabo en el entorno de la plataforma Delft-FEWS (Deltares, 2019c), implementando los procedimientos para la inclusión de series históricas y de previsiones de oleaje, viento y presión atmosféricas proporcionados por MeteoGalicia (WW3, WRF), NOAA (GFS, GEFS), y ECMWF (ERA5).

También se dio comienzo a la configuración del modelo regional forzado por las previsiones de oleaje, viento, presión atmosférica y marea ejecutando de forma secuencial un período de *hindcast* para la obtención del estado inicial de la previsión y un período de *forecast* (10 días). La ejecución del modelo está planeada para llevarse a cabo cada 12 horas.

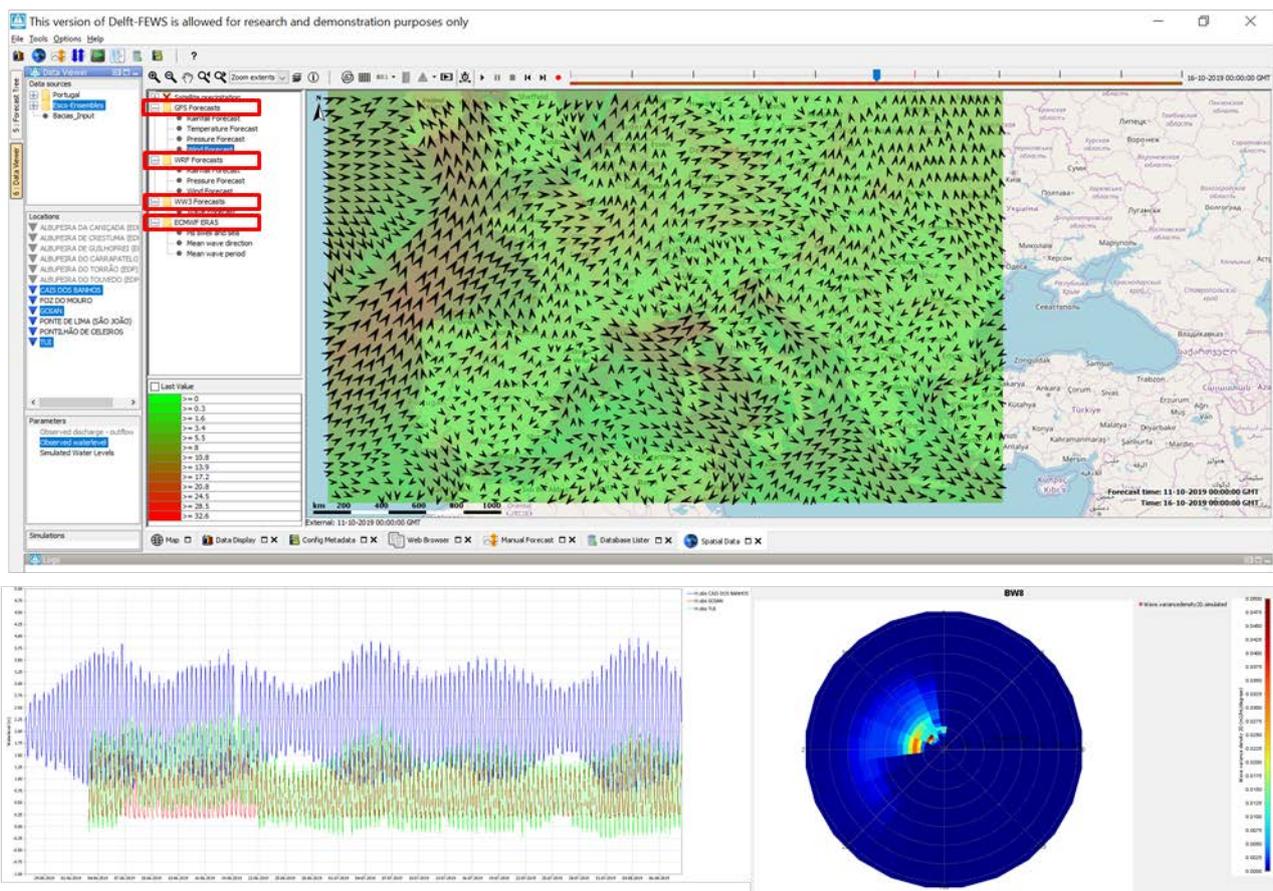


Figura 28. Configuración de diferentes fuentes de datos de previsión e información en la interfaz de Delft-FEWS.

En la Figura 28 se muestra la interfaz de Delft-FEWS donde se puede realizar el procesado y visualización de los diferentes tipos de datos de monitorización, de previsiones y resultados de los modelos integrados en la plataforma.

En esta sección se han presentado los diferentes modelos numéricos para la simulación de procesos de hidráulica marítima, así como una metodología para la modelización integrada de procesos costeros aplicada en casos de estudio de la costa noroeste portuguesa. Los resultados obtenidos permiten consolidar el conocimiento sobre los procesos costeros, que puede sentar bases sólidas para el apoyo a la toma de decisiones relativas a las condiciones de resiliencia de las regiones costeras.

5.3 Modelización GIS

Las herramientas presentadas en las secciones anteriores requieren en general de un conocimiento experto para su aplicación, o proporcionan datos en bruto que es necesario procesar para obtener un resultado interpretable por parte de los gestores. En muchos casos, los ejemplos de la literatura están adaptados a las particularidades del estudio en cuestión y de la zona de trabajo, con lo que su generalización no es inmediata o incluso posible (Narra et al., 2017; 2019).

Con el objetivo de proporcionar herramientas fácilmente interpretables (generalmente en formato mapa), de aplicación a diferentes escalas temporales y espaciales, y proporcionando un elevado grado de automatización que facilite su implementación por los agentes de interés no expertos, se han desarrollado aplicaciones que sistematizan y automatizan estas tareas, generalmente ejecutables en entornos de GIS como ArcGIS y QGIS.

Una de las herramientas con más implantación en la evaluación de la erosión y la modificación de la línea de costa es el Digital Shoreline Analysis System, una aplicación desarrollada por el U.S. Geological Survey (Thieler et al., 2009), que actualmente está en su versión 5.0. DSAS 5.0 es un complemento de ArcGIS que facilita el cálculo de tasas de cambio de la línea de costa a partir de posiciones históricas de la misma. Incorpora métodos para establecer localizaciones de medida, calcular tasas, así como para evaluar la fortaleza estadística de los cálculos y las proyecciones de la posición de la línea de costa con horizontes temporales de 10 y/o 20 años. Los ejemplos de utilización de DSAS en la literatura son múltiples y actuales, aunque cabe citar los más próximos al área de interés para MarRISK realizados en costas gallegas (Gómez-Pazo et al., 2019; Pérez-Alberti et al., 2013) y portuguesas (Cenci et al., 2013; Nave y Rebêlo, 2019), así como el caso de estudio de la costa de Aveiro descrito en la sección 4.1.2. Otras aplicaciones con objetivos similares y complementarios que cabe citar son BeachTools (Hoeke et al., 2001) o SCAPEGIS (Koukoulas et al., 2005).

De forma complementaria, los entornos de trabajo GIS más empleados, como ArcGIS o QGIS, permiten construir algoritmos de procesamiento de la información geográfica y

georreferenciada para obtener los resultados deseados. Este modo de trabajo es especialmente interesante para el cálculo de índices de vulnerabilidad y evaluación de riesgo, y facilitan su uso sistemático, con requisitos moderados de cualificación técnica y fácilmente interpretable y comunicable a los grupos de interés. Estas características facilitan su aceptación por los responsables de la gestión costera (Narra et al., 2017). Como ejemplos de aplicación de esta metodología usando el entorno ArcGIS *Model Builder* cabe citar el estudio de retroceso y avance de la línea de costa en el norte de Francia (Chaaban et al., 2012) o el desarrollo de un método de evaluación de la susceptibilidad costera a la erosión en el suroeste de España (Rizzo et al., 2018).

Otro desarrollo destacable es el CERA (*Coastal Erosion Risk Assessment*), actualmente en su versión 2.0, desarrollado en la Universidade de Aveiro, en Portugal, y participante en MarRISK (Narra et al., 2017; 2019). CERA 2.0 se basa en un modelo conceptual de evaluación de riesgo de tipo SPRC (*Source-Pathway-Receptor-Consequence*, Origen-Recorrido-Receptor-Consecuencia; Samuels y Gouldby, 2009) que calcula índices de distintos aspectos y los sintetiza en índices de vulnerabilidad, consecuencia y finalmente riesgo de erosión costera. Su implementación se lleva a cabo en un entorno QGIS, y emplea su *Graphical Modeler* para conectar los diferentes datos de entrada y geoprocesamientos intermedios para obtener los resultados buscados (Figura 21).

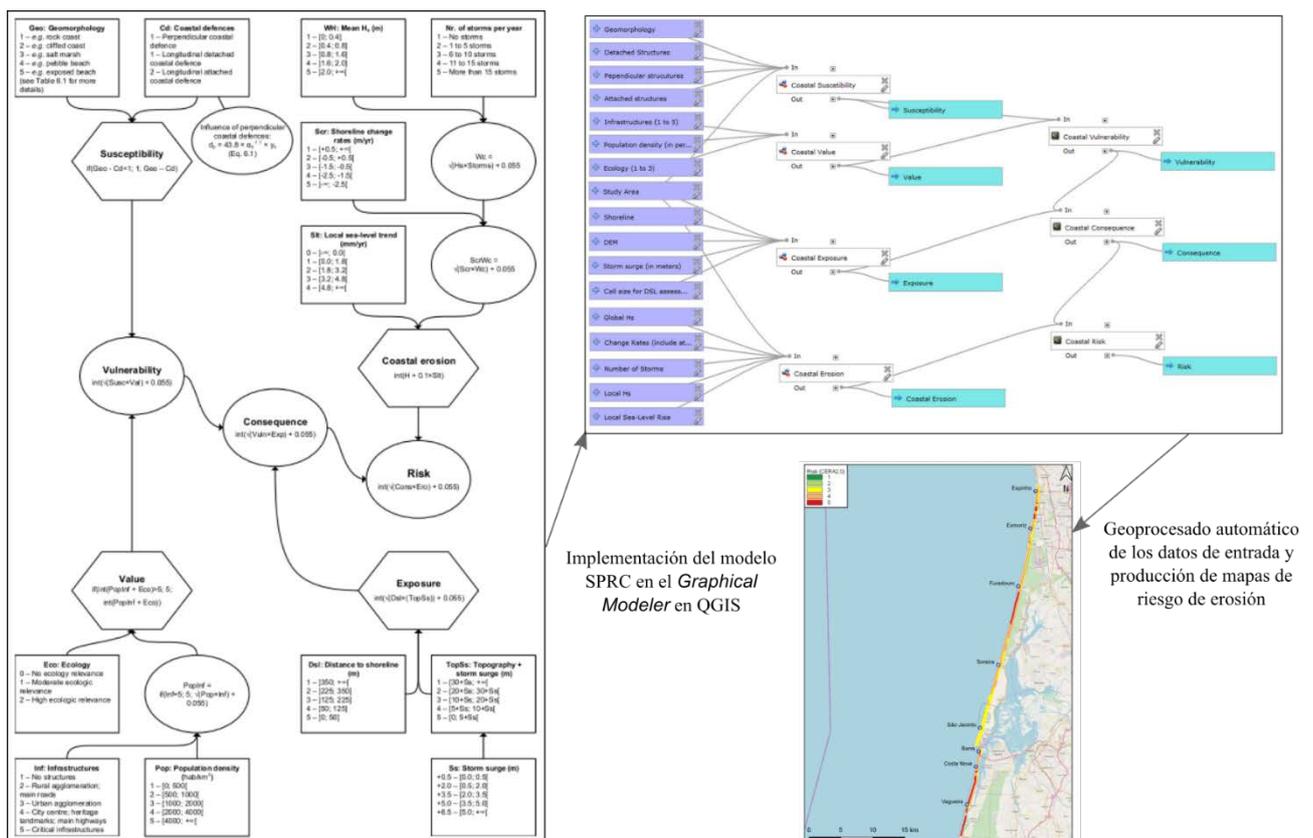


Figura 29. Algoritmo implementado en CERA 2.0, junto a su implementación en la interfaz del Graphical Modeler de QGIS y ejemplo de aplicación en un tramo de costa próximo a Aveiro, Portugal (modificado de Narra et al., 2019)

CERA 2.0 está específicamente diseñado para tener en consideración la erosión de largo plazo, así como la erosión consecuencia de eventos extremos. Aunque está enfocado para trabajos a escalas regionales típicas de la gestión costera, tiene flexibilidad para adaptarse a otras escalas. Aunque su desarrollo se centró en su aplicación a playas arenosas dominadas por el oleaje, puede adaptarse con relativa sencillez a otro tipo de ambientes.

6 Valor Añadido

Las herramientas presentadas en este documento pueden emplearse de forma aislada, como parte de una evaluación específica de una zona concreta, o formar parte de un conjunto de procesos sistematizados y estandarizados para la evaluación de los riesgos costeros. Un ejemplo destacable de este tipo de marco de trabajo es el *Coastal Risk Assessment Framework* (CRAF; Viavattene et al., 2018), desarrollado como resultado del proyecto *Resilience Increasing Strategies for Coasts Toolkit* (RISC-KIT; van Dongeren et al., 2014; 2018). Esta metodología contempla la evaluación de riesgos costeros, entre ellos el de erosión, en dos fases para la optimización de los recursos y la información de partida disponible. En la primera fase (*CRAF phase 1*) se lleva a cabo un proceso de identificación de áreas con un probable elevado riesgo a partir de su exposición potencial. Es un cribado a escala regional, que subdivide la costa en tramos de aproximadamente 1 km de largo, y basado en el cálculo de índices que tienen en cuenta las amenazas y la exposición (van Dongeren et al., 2014). Una vez completada esta fase, la segunda fase (*CRAF phase 2*) tiene como objetivo la identificación de zonas críticas (*hotspots*) especialmente expuestas a las amenazas, sobre las que se lleva a cabo un análisis más detallado y completo. Estas zonas deben ser contiguas, entre 1-10 km de largo, y su relación amenaza-impacto debe ser independiente de otras zonas críticas, aunque la amenaza puede ser común a varias de ellas. En la Figura 22 se representa de forma esquemática la metodología del CRAF.

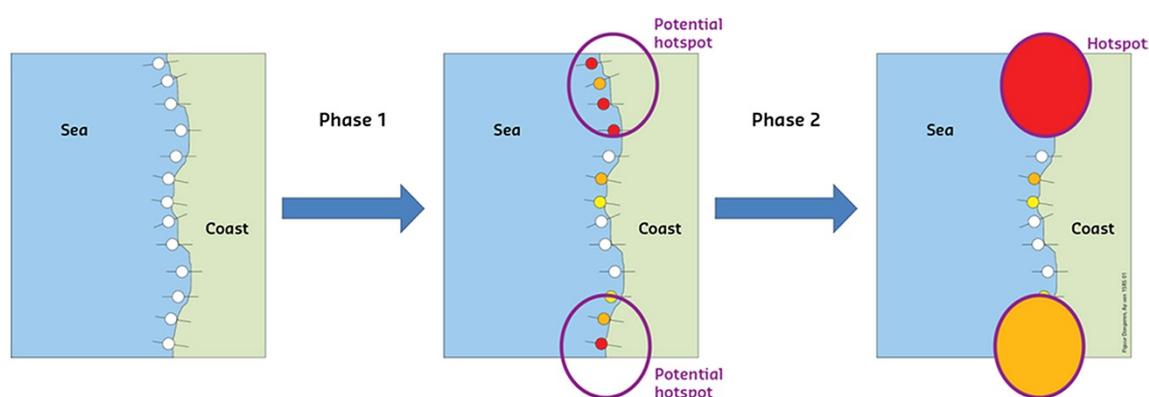


Figura 30. Flujo de trabajo en el marco de CRAF, en el que se evalúa el riesgo costero en dos fases para la identificación de zonas potenciales de riesgo crítico para una evaluación posterior más detallada (tomado de van Dongeren et al., 2018)

Este marco de trabajo presenta importantes ventajas al ser una herramienta de apoyo a los gestores encargados de tomar decisiones, que por un lado obtienen una perspectiva regional de la

distribución de riesgo y un análisis más detallado de riesgos, impactos, y efectos indirectos y sistémicos derivados. Para este análisis, se apoya en herramientas como las que se han descrito en este entregable como los modelos numéricos o los modelos GIS. Además, cuenta con herramientas dirigidas a evaluar la recuperación de zonas afectadas, así como la incorporación de conocimiento proporcionado por los grupos de interés para el ajuste o calibración de la importancia relativa de los indicadores en los que se basa.

De forma más general, estas herramientas se pueden integrar en un marco de evaluación y respuesta siguiendo el modelo DPSIR (*Driver-Pressure-State-Impact-Response*; Factores determinantes-Presiones-Estado-Impacto-Respuesta), adoptado por la Agencia Europea de Medioambiente (EEA, 1999). Este modelo permite integrar todos los aspectos del riesgo a evaluar en una secuencia donde se contemplan las relaciones entre todos los miembros de la cadena, así como su retroalimentación una vez se establecen las respuestas (Figura 23). Este modelo es especialmente útil en describir las relaciones entre el origen y las consecuencias de problemas ambientales. Para entender su dinámica, sin embargo, es más importante comprender las relaciones entre los elementos de la cadena DPSIR (EEA, 1999).

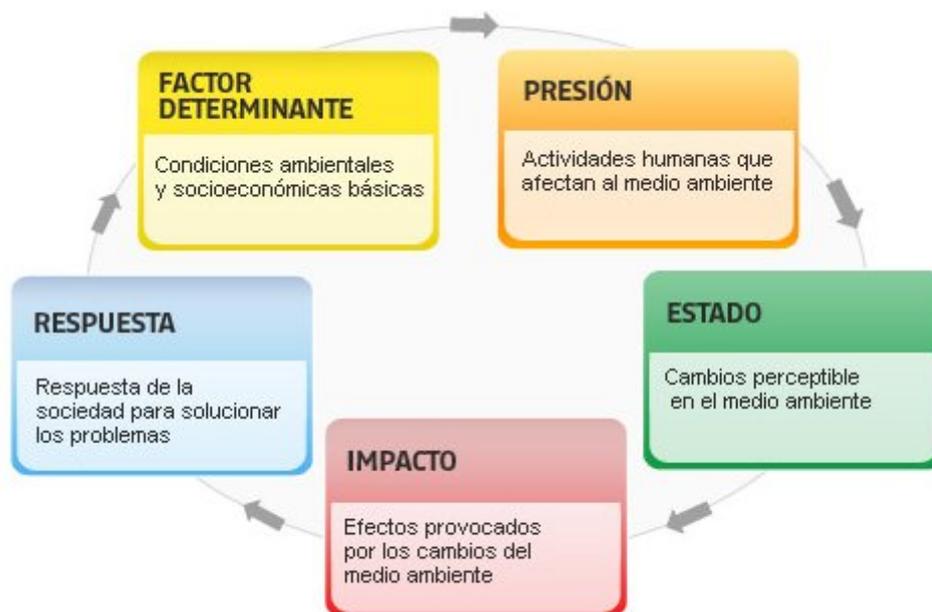


Figura 31. Representación del modelo DPSIR, en el que establece la interrelación entre todos los elementos involucrados (tomado de <https://servicio.mapama.gob.es/sia/indicadores/modelo.jsp>).

El análisis completo de un riesgo siguiendo este modelo debería proporcionar información sobre todos los elementos de la cadena DPSIR, mediante indicadores que relacionen las actividades humanas, sus impactos y las respuestas a los mismos (EEA, 1999). Sin embargo, con frecuencia no todos los elementos de la cadena son posibles o fáciles de cuantificar (EUROSION, 2002). Un ejemplo general de la aplicación de este modelo al análisis de la erosión costera es el presentado en el informe EUROSION (2002) y reproducido en la Tabla 7. Sin embargo, su

concreción pone de manifiesto la ausencia de elementos concretos en algunos de los elementos DPSIR (Figura 24).

Tabla 8. Implementación del modelo DPSIR enfocada al análisis del riesgo de erosión efectuada en el ámbito del proyecto EUROSION (modificado de EUROSION, 2002).

Factores determinantes	Presiones	Estado	Impacto	Respuesta
Procesos naturales y no naturales	Ritmo de erosión	Presencia de erosión	Valor de elementos en riesgo	Inversiones en protección costera

Coastal Erosion Indicators						
		Driving Forces	Pressure	State	Impact	Response
Proposed Indicators						
	Coastal erosion and propagation trends			Presence or erosion changes in coastal erosion between 1985 and 2002	Impact of coastal erosion on existing infrastructure (capital at risk) Impact of coastal erosion on protected land (habitats, biodiversity)	Investments on coastal protection (km of renourished beach, permits for coastal armoring, number of permitted artificial reefs; volume of dredged material disposed)
				rate of coastal erosion		
	Erosion hotspots Impact of erosion: values at risk			Presence or erosion	Erosion hotspots Impact of coastal erosion on existing infrastructure (capital at risk) Impact of coastal erosion on protected land (habitats, biodiversity)	
	Climate Change : Storm surges	Climate Change	Storm Surges	Flooded areas	human / economic capital at risk	cost of flood defence; permits for coastal armoring, number of permitted artificial reefs
	Climate Change: Sea Level Rise	Climate Change	Sea Level Rise	Shore Line recession Flooded areas	human / economic capital at risk	
	Impact of human activities in Coastal Zones		increased population + development extention of harbour facilities; tourism		Impact on erosion	

Figura 32. Implementación del modelo DPSIR recogido en la Tabla 7 en el ámbito del proyecto EUROSION (tomado de EUROSION (2002)).

Algunos ejemplos de la aplicación de este modelo al análisis de la erosión o la gestión costera son los casos de estudio de sostenibilidad en la gestión costera de Irlanda, España y Rumanía (Sánchez-Arcilla et al., 2016), la identificación de respuestas de gestión en áreas costeras con elevada presión urbanística y turística en Argentina (Semeoshenkova et al., 2017), y el proyecto EUROSION (EUROSION, 2002).

7 Evaluación del Servicio Ecosistémico de los Sistemas Dunares

Los hábitats costeros marinos proporcionan importantes bienes y servicios, como por ejemplo materias primas, protección costera, mecanismos de control de la erosión, acuíferos y purificación de aguas, protección de la flora y fauna, almacenamiento de carbono, turismo, actividades de recreo, e investigación (Barbier et al., 2011; Drius et al., 2019). Estos ecosistemas costeros son la principal protección de las poblaciones costeras, de sus propiedades, y de su actividad económica, frente a amenazas como inundaciones y tormentas, al actuar de defensa frente a condiciones meteorológicas extremas (Barbier, 2017; Sharp et al., 2018). Los arrecifes de coral, los manglares, las praderas de fanerógamas marinas, las marismas, y las dunas proporcionan una protección natural frente a las inundaciones, el clima marítimo asociado a las tormentas y la erosión costera al ejercer de barreras naturales que atenúan la altura del oleaje y la intensidad de las corrientes, disipando la energía del oleaje y contribuyendo a la estabilización del sedimento (Sharp et al., 2018), lo que se reconoce como un importante servicio ecosistémico (Barbier et al., 2011; Arkema et al., 2013; Drius et al., 2019).

La Acción 2.2 del Proyecto MarRISK se enfoca en la evaluación de la vulnerabilidad del noroeste de la costa portuguesa frente a la erosión e inundaciones mediante la aplicación del modelo de Vulnerabilidad Costera InVEST (Arkema et al., 2013), cuyos resultados se presentarán en el entregable E2.5 (Servicios Ecosistémicos Costeros para la Protección Costera). Este modelo se basa en una comparativa de la exposición a la erosión e inundación como resultado de eventos meteorológicos extremos teniendo en cuenta las características naturales y geofísicas de los hábitats costeros. Para llevar a cabo esta tarea, el modelo calcula un índice de exposición y genera mapas de población costera a partir de la distribución espacial de siete variables biogeofísicas; la geomorfología, el relieve, el cambio local del nivel del mar, la exposición al viento y al oleaje, hábitats naturales, así como la cota potencial de sobreelevación del nivel del mar por causas meteorológicas

En la zona de estudio de esta acción, el noroeste de Portugal, el principal tipo de hábitat son dunas arenosas, aunque existen también pequeñas áreas de marismas en el interior de estuarios. Por tanto, el foco de este trabajo es la evaluación de los servicios ecosistémicos proporcionados por las dunas arenosas, con consideración especial para las dunas con amplia cobertura vegetal, donde esta protección se incrementa de forma exponencial (Barbier, 2017). La integración de datos proporcionados en otras tareas del proyecto MarRISK con la distribución de vegetación y tipos de

cobertura del terreno, permite la evaluación de la vulnerabilidad costera del noroeste de Portugal frente a la erosión costera y las inundaciones. Los mapas resultantes del modelo representan la exposición de esta costa a la erosión e inundaciones, tomando en consideración la presencia o ausencia de dunas arenosas con vegetación, así como los escenarios futuros de ascenso del nivel del mar (RCP 4.5 y RCP 8.5). Estos mapas ilustran los servicios de protección proporcionados por las dunas costeras, y son una herramienta importante para que los gestores encargados de la toma de decisiones comprendan la importancia de la protección de estos hábitats naturales.

8 Integración en la gestión costera

La gestión adecuada del riesgo de erosión requiere que las herramientas para su evaluación formen parte del conjunto de instrumentos empleados en la toma de decisiones por parte de los agentes con responsabilidad sobre la gestión costera. La elección de las estrategias de gestión representadas en la Figura 25 debería basarse en una comprensión adecuada de los procesos físicos involucrados en la erosión, así como en los condicionantes relacionados con la propiedad del territorio, financieros, legislativos, etc. (Williams et al., 2018).

En general se manejan cuatro escenarios de gestión, que incluyen la construcción de defensas costeras, la adaptación al cambio esperado, la retirada planificada o el sacrificio. Todas tienen sus ventajas e inconvenientes, que van desde las tangibles como el elevado coste y carácter temporal de las medidas de defensa, hasta el contenido emocional y responsabilidad pública del sacrificio (Williams et al., 2018). Los cuatro tipos de medidas no son excluyentes, sino que deberían considerarse como modelos que se pueden combinar para una gestión más efectiva del riesgo de erosión.

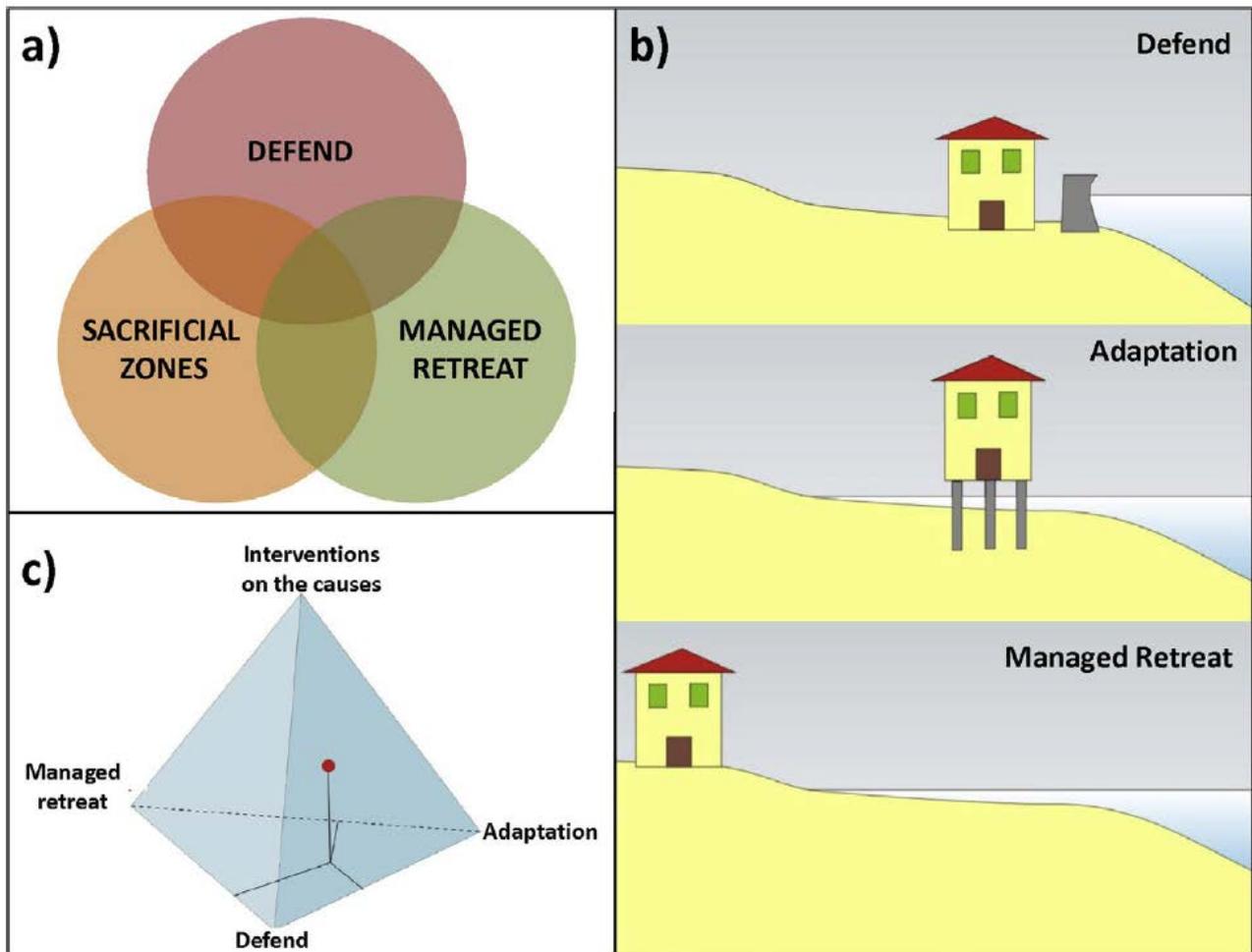


Figura 33. a) Estrategias de gestión de la respuesta frente a la erosión costera. b) Ejemplos de la gestión del riesgo de erosión mediante la construcción de defensas, la adaptación y la retirada planificada. c) Estrategias de gestión incluyendo la adaptación (tomada de Williams et al., 2018).

Las herramientas recopiladas en este entregable facilitan información para la toma de decisiones relacionada con la estrategia o combinación de estrategias a seguir. Su empleo forma parte de la fase de análisis, en que los gestores adquieren una comprensión adecuada del sistema natural y sus medidas de gestión previas, y control del ciclo de gestión, en que se evalúa la eficacia de estas medidas y su validez en el tiempo. En este sentido, los agentes gestores mediante estas herramientas pueden adaptar sus respuestas y reajustar sus medidas teniendo en cuenta los cambios de naturaleza dinámica relacionados con la erosión costera (Williams et al., 2018).

En particular, estas herramientas pueden formar parte del conjunto de instrumentos empleados por los gestores para definir los planes de actuación en la franja costera. Los SMP (*Shoreline Management Plans*) puestos en práctica en Inglaterra y Gales son ejemplos de estos planes con una segunda generación actualmente vigente y éxito contrastado. Estos SMP son planes de gestión donde se identifican los condicionantes asociados a la dinámica costera y se identifican las áreas de riesgo potencial, así como las consecuencias derivadas de los distintos escenarios de actuación propuestos. Las prioridades de estos planes son reducir el riesgo de inundación y erosión

para las personas y sus propiedades, y mejorar el medio ambiente, la economía y las comunidades en riesgo (DEFRA; 2006). Los SMP se basan en el concepto de celda sedimentaria, que define una región donde el ciclo sedimentario se encuentra cerrado y completo; es decir, en ella se encuentran las fuentes sedimentarias, sus rutas de transporte, y sus sumideros (EUROSION, 2004). Hacen referencia al área geográfica en la que el balance sedimentario se puede determinar, y por tanto permiten su análisis cuantitativo y facilitan su gestión. Las celdas sedimentarias, por su definición, no tienen por qué estar englobadas en una única región administrativa, y por tanto los SMP deben establecer mecanismos de gestión para la consecución de un estado sedimentario favorable, que optimice los costes de inversión en relación a la vulnerabilidad y exposición, así como promover la aceptación social de sus medidas y su revisión futura. Para ello, la segunda generación de estos planes considera políticas con una vigencia extendida desde 50 años hasta 100 años, y otorga una mayor presencia, consulta y consideración de las aportaciones de los agentes con interés en la gestión costera.

Las acciones disponibles para los responsables de la toma de decisiones amparadas por los SMP son 4:

- Mantener la línea vigente de defensa, mediante el mantenimiento o el cambio de las medidas de protección costera existentes.
- Avanzar la línea de defensa, mediante la construcción de nuevas medidas de protección costera hacia el mar, en relación a nuevos rellenos en la zona costera.
- Control planificado de la línea de costa, en la que se permite el movimiento de la misma con medidas para su control.
- No intervenir. Designar zonas en las que no se realizará ninguna intervención y se dejará a la naturaleza seguir su curso.

Otro de los instrumentos de gestión costera disponible para la incorporación de estas herramientas es el establecimiento de zonas de acomodación (*buffer* o *setback zones*), en las que se establecen áreas adyacentes a la costa donde se limitan el tipo de construcciones que pueden establecerse, de modo que el impacto potencial de la erosión se vea minimizado y no exijan grandes inversiones en medidas de protección. Las zonas de acomodación se pueden definir verticalmente, en la que estas limitaciones se aplican por debajo de una determinada cota, o se pueden establecer en términos horizontales, a partir de una distancia definida desde la línea de costa (Williams, 2018).

Estas estrategias de gestión se pueden combinar con otro tipo de medidas como son la identificación de zonas en riesgo crítico, la construcción de estructuras fácilmente reubicables, programas de recompra de la propiedad, expropiación y compensación, etc. En todos ellos, las herramientas presentadas en este entregable pueden informar del riesgo de erosión y contribuir a

una toma de decisiones más eficiente y mejor comunicación con los agentes con interés en la zona costera.

9 Conclusiones

Una correcta gestión del riesgo de erosión costera y de impactos en los servicios ecosistémicos proporcionados por los sistemas dunares requiere conocer las herramientas existentes para su evaluación, los requisitos necesarios para su aplicación, los datos en los que se basan, sus ventajas e inconvenientes. En este entregable se han enumerado y descrito los datos auxiliares básicos para su utilización. Para aquellos datos disponibles en repositorios accesibles a la comunidad científica se han aportado los enlaces a estos recursos.

Las herramientas presentadas se han descrito con una breve presentación de sus fundamentos, así como de ejemplos de su aplicación. En líneas generales estas herramientas se pueden clasificar en observaciones y monitorización, para llevar a cabo diagnósticos del estado de los sistemas costeros así como de tendencias de medio y largo plazo, simulaciones mediante modelos numéricos complejos, que permiten llevar a cabo predicciones a diferentes horizontes temporales, así como evaluar escenarios con distintas condiciones de contorno, y modelos GIS, donde se integran todos los datos geospaciales disponibles para llevar a cabo evaluaciones de forma simplificada y estandarizada, que contribuyen a un mejor procesado de información muy heterogénea en la que existen interrelaciones complejas.

Por último, se ha discutido el valor aportado por el empleo de estas herramientas y se han descrito ejemplos de la implementación de estas herramientas en la gestión del riesgo y del proceso de toma de decisiones por parte de los administradores de la gestión costera.

La resiliencia de las comunidades costeras requiere una adecuada gestión del riesgo de erosión, entre otros riesgos costeros como el de inundación o rebase de estructuras de protección. Estos riesgos se espera que se incrementen como consecuencia del cambio climático proyectado a corto y medio plazo. Por tanto, el aumento de la resiliencia exige una correcta implementación de las herramientas aquí presentadas, aisladas o en combinación, con el objetivo de informar adecuadamente a los agentes con intereses en la franja costera y a los encargados de la toma de decisiones de gestión de la seguridad, la calidad ecológica, y los aspectos socioeconómicos de las zonas costeras.

10 Referencias

- Alexandrakis, G., Poulos, S.E. 2014. An holistic approach to beach erosion vulnerability assessment. *Scientific Reports* 4, 1–8.
- Arkema, K.K., Guannel, G., Verutes, G., Wood, S.A., Guerry, A., Ruckelshaus, M., Kareiva, P., Lacayo, M., Silver, J.M. 2013. Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms. *Nature Climate Change*, 3(10), p.913.
- Baptista, P., Cunha, T.R., Matias, A., Gama, C., Bernardes, C., Ferreira, O. 2011. New land-based method for surveying sandy shores and extracting DEMs: the INSHORE system. *Environmental Monitoring and Assessment* 182(1-4), 243-257.
- Barbier, E. B. 2017. Marine ecosystem services. *Current Biology* 27, R431–R510.
- Barbier, E. B., Hacker, S.D., Kennedy, C., Koch, E.W., Stier, A.C., Silliman, B.R. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs* 81(2), 169-193.
- Barnard, P.L., Erikson, L.H., Hansen, J.E. 2009. Monitoring and modeling shoreline response due to shoreface nourishment on a high-energy coast. *Journal of Coastal Research* 56, 29–33.
- Barnard, P.L., van Ormondt, M., Erikson, L.H., Eshleman, J., Hapke, C., Ruggiero, P., Adams, P.N., Foxgrover, A.C. 2014. Development of the Coastal Storm Modeling System (CoSMoS) for predicting the impact of storms on high-energy, active-margin coasts. *Natural Hazards* 74, 1095–1125.
- Bayram, A., Larson, M., Hanson, H. 2007. A new formula for the total longshore sediment transport rate. *Coastal Engineering*, 54(9), 700-710.
- Bergillos, R.J., López-Ruiz, A., Medina-López, E., Moñino, A., Ortega-Sánchez, M. 2018. The role of wave energy converter farms on coastal protection in eroding deltas, Guadalfeo, southern Spain. *Journal of Cleaner Production* 171, 356–367.
- Bio, A., Bastos, L., Granja, H., Pinho, J.L.S., Gonçalves, J.A., Henriques, R., Madeira, S., Magalhães, A., Rodrigues, D. 2015. Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: two Portuguese case studies. *Journal of Integrated Coastal Zone Management* 15(1), 47-63.
- Booij, N., Ris R.C., Holthuijsen, L.H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research* 104, 7649-7666.
- Boudet, L., Sabatier, F., Radakovitch, O. 2017. Modelling of sediment transport pattern in the mouth of the Rhone delta: Role of storm and flood events. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 198, 568–582.
- Bruun, P., 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. Journal of the Waterways and Harbors Division. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 88, 117–130.

- Bruun, P. 1988. The Bruun Rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two-and three-dimensional usages. *Journal of Coastal Research* 4(4), 627–648.
- Cenci, L., Disperati, L., Sousa, L.P., Phillips, M., Alve, F.L. 2013. Geomatics for Integrated Coastal Zone Management: multitemporal shoreline analysis and future regional perspective for the Portuguese Central Region. *Journal of Coastal Research* 165, 1349–1354.
- CERC (USACE Waterways Experiment Station's Coastal Engineering Research Center). 1984. Shore protection manual. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, USA.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, 553–597.
- DEFRA. 2006. Shoreline management plan guidance. Volume 1: Aims and requirements. DEFRA, London. 54 p.
- Deltares. 2014. Delft3D-Flow, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. *User Manual, Version 3.15.34158*, 684 pp.
- Deltares. 2019a. XBeach. <https://www.deltares.nl/en/software/xbeach> Accedido en Mayo de 2019.
- Deltares. 2019b. Delft3D. <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>. Accedido en Mayo de 2019.
- Deltares. 2019c. FEWS. <https://oss.deltares.nl/web/delft-fews/> Accedido en Mayo de 2019.
- Dissanayake, P., Brown, J., Karunaratna, H. 2014. Modelling storm-induced beach/dune evolution: Sefton coast, Liverpool Bay, UK. *Marine Geology* 357, 225–242.
- van Dongeren, A., Ciavola, P., Viavattener, C., de Kleermaeker, S., Martinez, G., Ferreira, O., Costa, C., McCall, R. 2014. RISC-kit: resilience-increasing strategies for coasts – toolKIT. *Journal of Coastal Research* 70, 366-371.
- van Dongeren, A., Ciavola, P., Martinez, G., Viavattene, C., Bogaard, T., Ferreira, O., Higgins, R., McCall, R., 2018. Introduction to RISC-KIT: Resilience-increasing strategies for coasts. *Coastal Engineering* 134, 2–9.
- Drius, M., Jones, L., Marzialetti, F., de Francesco, M.C., Stanisci, A., Carranza, M.L. 2019. Not just a sandy beach. The multi-service value of Mediterranean coastal dunes. *Science of the Total Environment* 668, 1139-1155.

- EEA. European Environment Agency. 1999. Environmental Indicators: Typology and overview. Technical Report No 25. 19 p.
- EEA, European Environmental Agency. 2019. Europe's seas and coasts. Disponible en <https://www.eea.europa.eu/themes/water/europes-seas-and-coasts#environmental-challenges>. Accedido en Septiembre de 2019.
- Egbert, G. D., Svetlana, Y. E. 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19(2), 183-204.
- Enríquez, A.R., Marcos, M., Falqués, A., Roelvink, D. 2019. Assessing beach and dune erosion and vulnerability under sea level rise: A Case study in the Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science* 6, 1–12.
- European Commission. 2006. An exhaustive analysis of employment trends in all sectors related to sea or using sea resources. Country report – Portugal. ECOTEC Research & Consulting, Birmingham, United Kingdom, 13 p.
- EUROSION. 2002. Coastal Erosion Indicators Study. Universitat de Barcelona, Centre d'Estudis Ambientals, G.I.M. Geographic Information Management NV, 50 p.
- EUROSION. 2004. Living with coastal Erosion in Europe. Sediment and Space for Sustainability: Results from the EUROSION Study. Doody, P., Ferreira, M., Lombardo, S., Lucius, I., Misdorp, R., Niesing, H., Salman, A., Smallegange, M. (Eds.). Luxembourg, 40 p.
- Fernández-Fernández, S., Baptista, P., Martins, V.A., Silva, P.A., Abreu, T., Pais-Barbosa, J., Bernardes, C., Miranda, P., Rocha, M.V.L., Santos, F., Bernabeu, A., Rey, D. 2016. Longshore Transport Estimation on Ofir Beach in Northwest Portugal: Sand-Tracer Experiment. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 142(2), 04015017.
- Fernández-Fernández, S., Silva, P.A., Ferreira, C.C., Coelho, C., Carracedo-García, P.E. 2019a. Climate change impact on longshore sediment transport: Costa Nova Beach (NW Portugal). Workshop CESAM contributions for Environmental Management & Spatial Planning, 3rd May 2019, Aveiro (Portugal)
- Fernández-Fernández, S., Baptista, P., Bernardes, C., Silva, P.A., Fontán-Bouzas, A., López-Olmedilla, L., Ferreira, C. 2019b. Variação da linha de costa em praias arenosas Aveiro (Portugal). Livro de Resumos do IX Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Lisboa.
- Ferreira, Ó., Plomaritis, T.A., Costas, S. 2017. Process-based indicators to assess storm induced coastal hazards. *Earth-Science Reviews* 173, 159–167.

- Fitton, J.M., Hansom, J.D., Rennie, A.F. 2018. A method for modelling coastal erosion risk: the example of Scotland. *Natural Hazards* 91, 931–961.
- GEBCO. 2018. General Bathymetric Chart of the Oceans. <http://www.gebco.net/> Accedido en Mayo de 2019.
- Gómez-Pazo, A., Pérez-Alberti, A., Pérez, X.L.O. 2019. Recent evolution (1956-2017) of Rodas Beach on the Cíes Islands, Galicia, NW Spain. *Journal of Marine Science and Engineering* 7, 125.
- Gornitz, M.V., Daniels, R.C., White, T.W., Birdwell, K.R. 1994. The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 12, 327-338.
- Granja, H., Pinho, J., Mendes, J. 2014. A Multi-criteria Approach for Erosion Risk Assessment Using a New Concept of Spatial Unit Analysis, Wave Model and High Resolution DEMs. En: C. Finkl & C. Makowski (Eds.), *Remote Sensing and Modeling*. Springer, Cham, Switzerland, pp. 481–494.
- Harley, M.D., Kinsela, M.A., Sánchez-García, E., Vos, K. 2019. Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images. *Coastal Engineering* 150, 175-189.
- Hoeke, R., Zarillo, G.A., Synder, M. 2001. A GIS based tool for extracting shoreline positions from aerial imagery (BeachTools). U.S. Army Corps of Engineers, ERDC/CHL CHETN-IV-37. Vicksburg, Mississippi, 11p.
- IPCC. 2014. C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 p.
- Jäger, W.S., Christie, E.K., Hanea, A.M., den Heijer, C., Spencer, T. 2018. A Bayesian network approach for coastal risk analysis and decision making. *Coastal Engineering* 134, 48–61.
- Kamphuis, J.W. 1991. Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 117(6), 624-640.
- Komar, P.D., Inman, D.L.: 1970. Longshore sand transport on beaches. *Journal of Geophysical Research* 75(30), 5914-5927.
- Koukoulas, S., Nicholls, R.J., Dickson, M.E, Walkden, M., Hall, J.W, Pearson, S.G, Mokrech, M. Richard, J. 2005. A GIS tool for analysis and interpretation of coastal erosion model outputs (SCAPEGIS). *Coastal Dynamics 2005*. American Society of Civil Engineers.

- López-Olmedilla, L., Fontán-Bouzas, A., Silva, P.A., Fernández-Fernández, S. 2019. Assessment of the impact of Adrian Storm in W Portugal coast: Natural vs anthropized beaches. Libro de resúmenes de las X Jornadas de Geomorfología Litoral, Casteldefells, España.
- Luan, H.L., Ding, P.X., Wang, Z.B., Ge, J.Z., 2017. Process-based morphodynamic modeling of the Yangtze Estuary at a decadal timescale: Controls on estuarine evolution and future trends. *Geomorphology* 290, 347–364.
- McLaughlin, S., Cooper, J.A.G., 2010. A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers? *Environmental Hazards* 9(3), 233-248.
- Mentaschi, L., Voudouskas, M.I., Voukouvalas, E., Dosio, A., Feyen, L. 2017. Global changes of extreme coastal wave energy fluxes triggered by intensified teleconnection patterns. *Geophysical Research Letters* 44, 2416-2426
- Mil-Homens, J., Ranasinghe, R., van Thiel de Vries, J.S.M., Stive, M.J.F. 2013. Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas. *Coastal Engineering* 75, 29-39.
- Narra, P., Coelho, C., Sancho, F., Palalane, J. 2017. CERA: An open-source tool for coastal erosion risk assessment. *Ocean & Coastal Management* 142, 1–14.
- Narra, P., Coelho, C., Sancho, F. 2019. Multicriteria GIS-based estimation of coastal erosion risk: Implementation to Aveiro sandy coast, Portugal. *Ocean and Coastal Management* 178, 104845.
- Nave, S., Rebêlo, L. 2018. High-resolution geological cartography and coastal evolution assessment at Armação de Pêra – Galé sector: a prototype for a national coastal mapping. *Journal of Coastal Conservation* 22, 1031–1043.
- Pérez-Alberti, A., Pires, A., Freitas, L., Chamine, H. 2013. Shoreline change mapping along the coast of Galicia, Spain. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering* 166, 125–144.
- Pinho, J.L.S., Granja, H. 2018. Coastal erosion: results of a decade of monitoring at south of Mira beach, Portugal. In IX Simpósio da Margem Ibérica Atlântica, 4 a 7 de Setembro 2018. Coimbra, Portugal.
- Plomaritis, T.A., Costas, S., Ferreira, Ó. 2018. Use of a Bayesian Network for coastal hazards, impact and disaster risk reduction assessment at a coastal barrier (Ria Formosa, Portugal). *Coastal Engineering* 134, 134–147.
- Reguero, B. G., Losada, I.J., Méndez, F.J. 2019. A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nature Communications* 10, 205
- van Rijn, L.C. 2014. A simple general expression for longshore transport of sand, gravel and shingle. *Coastal Engineering* 90, 23-29.

- Rizzo, A., Aucelli, P.P.C., Gracia, F.J., Anfuso, G. 2018. A novelty coastal susceptibility assessment method: application to Valdelagrana area (SW Spain). *Journal of Coastal Conservation* 22, 973–987.
- Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., Dastgheib, A. 2018. Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering* 134, 103–123.
- Roelvink, D., Reniers, A.J.H.M., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., McCall, R. 2010. XBeach model description and manual. *Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology. Report.*
- Roelvink, D., Reniers, A. 2012. A guide to modelling coastal morphology. *Advances in Coastal and Ocean Engineering*, 12. World Scientific Publishing, Singapur, 274 p.
- Rosati, J.D. 2005. Concepts in sediment budgets. *Journal of Coastal Research* 21(2), 307-322.
- Samuels, P., Gouldby, B. 2009. FLOODsite Language of Risk, 2nd edition. HR Wallingford, Wallingford, United Kingdom.
- Sánchez-Arcilla, A., García-León, M., Gracia, V., Devoy, R., Stanica, A., Gault, J. 2016. Managing coastal environments under climate change: Pathways to adaptation. *Science of the Total Environment* 572, 1336–1352.
- Sanuy, M., Jiménez, J.A. 2019. Sensitivity of storm-induced hazards in a highly curvilinear coastline to changing storm directions. The Tordera Delta Case (NW Mediterranean). *Water (Switzerland)* 11, 747.
- Satta, A., Snoussi, M., Puddu, M., Flayou, L., Hout, R. 2016. An index-based method to assess risks of climate-related hazards in coastal zones: The case of Tetouan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 175, 93–105.
- Semeoshenkova, V., Newton, A., Rojas, M., Piccolo, M.C., Bustos, M.L., Huamantincó Cisneros, M.A., Berninsone, L.G. 2017. A combined DPSIR and SAF approach for the adaptive management of beach erosion in Monte Hermoso and Pehuen Co (Argentina). *Ocean and Coastal Management* 143, 63–73.
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M. Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., Bierbower, W., Denu, D., Douglass, J. 2018. InVEST 3.6.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.

- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ergul, A. 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 – An ArcGIS extension for calculating shoreline change. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2008 – 1278*. (versión actual 5.0).
- Tolman, H. 2002. User Manual and system documentation of WAVEWATCH-III – version 2.22, N.O.A.A., National Centers for Environmental Prediction, OMB Technical Note 222, Camp Springs, MD, U.S.A.
- Tonnon, P.K., Huisman, B.J.A., Stam, G.N., van Rijn, L.C., 2018. Numerical modelling of erosion rates, life span and maintenance volumes of mega nourishments. *Coastal Engineering* 131, 51–69.
- Torresan, S., Zabeo, A., Rizzi, J., Critto, A., Pizzol, L., Giove, S., Marcomini, A. 2010. Risk assessment and decision support tools for the integrated evaluation of climate change on coastal zones. In: Swayne, D.A., Yang, Wanhong, Voinov, A.A., Rizzoli, A., Filatova, T. (Eds.), *Proceedings of the International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada*.
- Tu, L.X., Thanh, V.Q., Reyns, J., Van, S.P., Anh, D.T., Dang, T.D., Roelvink, D. 2019. Sediment transport and morphodynamical modeling on the estuaries and coastal zone of the Vietnamese Mekong Delta. *Continental Shelf Research* 186, 64–76.
- Viavattene, C., Jiménez, J.A., Ferreira, O., Priest, S., Owen, D., McCall, R. 2018. Selecting coastal hotspots to storm impacts at the regional scale: a Coastal Risk Assessment Framework. *Coastal Engineering* 134, 33-47.
- Vousdoukas, M., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Feyen, L. 2017. Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future* 5(3), 304-323.
- Williams, A., Rangel-Buitrago, N., Pranzini, E. & Anfuso, G. 2018. The management of coastal erosion. *Ocean & Coastal Management* 156, 4-20.
- Yin, K., Xu, S., Huang, W., Li, R., Xiao, H., 2019. Modeling beach profile changes by typhoon impacts at Xiamen coast. *Natural Hazards* 95, 783–804.